

М.П. Безсмертний

**ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ
В ТЕХНОЛОГІЇ
БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Навчальний посібник

Київ 2014

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

М.П. Безсмертний

ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ В ТЕХНОЛОГІЇ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

*Рекомендовано Міністерством освіти
і науки України як навчальний посібник
для студентів вищих навчальних закладів*

Київ 2014

УДК 66.02(0758)

ББК 35.11

Б53

Рецензенти: *О.М. Єфремов*, д-р техн. наук, професор (Донбаська національна академія будівництва);
В.П. Сербін, д-р техн. наук, професор (національний технічний університет «КПІ»);
В.І. Сівко, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, д-р техн. наук, професор (Київський національний університет будівництва і архітектури)

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів (лист Міністерства освіти і науки України № 1/11-12214 від 30.07 2013 року).

Безсмертний М.П.

Б53 Процеси і апарати в технології будівельних матеріалів: навч. посіб. / М.П. Безсмертний. – К.: КНУБА, 2014. – 204 с.

ISBN 978-966-627-177-1

У посібнику наведено класифікацію та характеристику основних процесів і апаратів, що мають суттєве значення у виробництві будівельних матеріалів, а також розглянуто основи теорії подібності і моделювання технологічних процесів і апаратів.

Призначений для студентів вищих навчальних закладів спеціальності 7,8.06010104 «Технологія будівельних конструкцій, виробів і матеріалів».

УДК 66.02(0758)

ББК 35.11

© М.П. Безсмертний, 2014

© КНУБА, 2014

ISBN 978-966-627-177-1

Зміст

Передмова	5
Вступ	6
Розділ I. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ НАУКИ	
ПРО ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ.....	8
1.1. Класифікація процесів технології будівельних матеріалів	8
Розділ II. ОСНОВИ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ	
І МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ І АПАРАТІВ	18
2.1. Аналогії	23
2.2. Основи теорії подібності і моделювання	24
2.3. Метод аналізу розмірностей фізичних величин ...	31
Розділ III. МЕХАНІЧНІ ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ	33
3.1. Теоретичні основи подрібнення	
твердих матеріалів	38
3.2. Класифікація і принципи роботи подрібнювачів..	41
3.3. Теоретична і фактична міцність матеріалів	43
3.4. Кінетика помелу і розмельність матеріалів	51
3.5. Загальні закономірності впливу зовнішнього середовища на кінетику помелу	56
3.6. Особливості властивостей	
тонкомелених порошків.....	61
3.7. Класифікація зернистих матеріалів	62
3.8. Методи визначення гранулометричного складу грубозернистих і дисперсних матеріалів.....	65
Розділ IV. ГІДРОМЕХАНІЧНІ ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ	75
4.1. Основні поняття прикладної гідростатики і гідромеханіки	75
4.2. Основне рівняння гідростатики	79
4.3. Гідродинаміка. Основні положення.....	84
4.4. Рівняння нерозривності потоку і витрати рідини....	86
4.5. Диференціальне рівняння руху Ейлера	87
4.6. Диференціальне рівняння руху рідини	
Нав'є – Стокса.....	88

Сучасне підприємство з виготовлення будівельних конструкцій, виробів і матеріалів є складним виробництвом, оснащеним різноманітними апаратами, в яких відбуваються технологічні процеси, пов'язані з різними методами обробки матеріалів – механічними, гідромеханічними, тепловими, масообмінними тощо.

У загальноінженерній підготовці студентів – майбутніх фахівців у галузі будівельної індустрії – важлива роль належить курсу «Процеси і апарати в технології будівельних матеріалів». Він є перехідним від загальноінженерного циклу дисциплін до спеціального: студенти можуть застосувати знання із загальноінженерних дисциплін для розв'язання важливих завдань з розрахунку, проектування й оптимізації роботи апаратів у процесі виробництва будівельних матеріалів.

Вивчення курсу ґрунтується на таких дисциплінах: «Фізика», «Хімія», «Будівельне матеріалознавство», «Опір матеріалів». Знання з курсу «Процеси і апарати в технології будівельних матеріалів» дає змогу наблизитися до вивчення таких основоположних для інженерів-будівельників і технологів дисциплін, як «Механічне обладнання», «Виробнича база будівництва», «Теплові установки» та ін.

Автор висловлює щире подяку доктору технічних наук, професорові кафедри технології будівельних конструкцій виробів і матеріалів Донбаської національної академії будівництва і архітектури О.М. Єфремову, доктору технічних наук, професору кафедри хімічної технології в'язучих речовин Київського національного технічного університету «КПІ» В.П. Сербіну, доктору технічних наук, професору кафедри машин та обладнання технологічних процесів Київського національного університету будівництва і архітектури, лауреату Державної премії України в галузі науки і техніки В.Й. Сівко за цінні поради, висловлені під час підготовки рукопису; кандидатові технічних наук, професору кафедри будівельних матеріалів Ю.Г. Гасану за обговорення рукопису в процесі підготовки його до друку.

4.7. Рівняння Бернуллі	90
4.8. Гідродинамічна подібність. Основні критерії	92
4.9. Режими руху рідин	94
4.10. Рух неньютонівських рідин	96
4.11. Перемішування мас	106
Розділ V. ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ	121
5.1. Основи теплообміну	122
5.2. Рушійна сила теплових процесів	131
5.3. Суть процесів сушіння	132
5.4. Вологий стан матеріалу під час сушіння	134
5.5. Класифікація установок для теплової обробки	137
Розділ VI. ОСНОВИ МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ	139
6.1. Основні закони масообмінних процесів	141
6.2. Критерії подібності масообміну. Критеріальне рівняння конвективного масоперенесення	144
6.3. Рівняння масопередачі	146
6.4. Матеріальний баланс масопередачі і рівняння робочої лінії процесу	149
6.5. Основні закономірності масоперенесення в капілярно-пористих матеріалах	150
6.6. Механізми тепло- і масообміну під час тепловологої обробки	152
6.7. Випалювання виробів	167
Розділ VII. ФОРМУВАННЯ ВИРОБІВ	173
7.1. Напівсухе пресування	173
7.2. Метод пластичного формування	182
7.3. Метод шлікерного лнття	187
7.4. Вібраційне формування	190
7.5. Центрифугування	197
Список літератури	202

Вступ

У сучасних умовах будівництва використовують велику кількість матеріалів і виробів, конкурентна спроможність яких на ринку визначається багатьма показниками. Показники якості будівельних матеріалів певною мірою залежать від технології їх виготовлення й апаратів, які застосовують для їх виробництва.

У процесі виготовлення будівельних матеріалів вихідні речовини внаслідок хімічної взаємодії змінюють свій агрегатний стан, внутрішню будову і склад. Одночасно з хімічними реакціями відбуваються фізико-механічні і фізико-хімічні процеси: подрібнення і класифікація твердих матеріалів, транспортування і перемішування, формування, сушіння і випалювання виробів. При цьому спосіб проведення цих процесів інколи визначає можливість здійснення технологічного процесу в цілому.

Технологія виробництва різноманітних матеріалів і виробів складається з цілого ряду однотипних процесів, які характеризуються загальними закономірностями і здійснюються в аналогічних за принципом дії машинах і апаратах.

Аналіз закономірностей основних процесів та розробку узагальнених методів розрахунку апаратів виконують на підставі фундаментальних законів фізики, хімії, фізичної хімії, термодинаміки та інших наук.

У курсі «Процеси і апарати...» висвітлено закономірності переходу від лабораторних процесів і апаратів до промислових. Знання цих закономірностей та перенесення результатів, отриманих за допомогою моделі, на промисловий об'єкт, потрібне для проектування сучасних виробничих процесів виготовлення будівельних матеріалів і виробів.

Наприклад, процес, досліджений в лабораторних умовах з погляду механізму і кінетики хімічної реакції, закономірностей її перебігу в часі і т.п., не завжди може бути відтворений з такими самими показниками у виробничих умовах. Для успішного здійснення процесу в промисловому апараті, крім фізико-хімічної

суті процесу, слід визначити його параметри залежно від конструкції апарата, напрямку потоків і режимів їх руху, швидкості перенесення тепла та маси тощо.

Сукупний вплив цих факторів визначає макрокінетику процесу, яка пов'язана з масовим рухом макрочастинок.

У курсі «Процеси і апарати...» розглянуто макрокінетику основних процесів технології виробництва будівельних матеріалів. При цьому використано відомості з макрокінетики елементарних процесів на молекулярному рівні, таких як теплопровідність, молекулярна дифузія тощо, які вивчають у фізиці, фізичній хімії, термодинаміці та інших науках.

Таким чином, дисципліна «Процеси і апарати...» є інженерною дисципліною, важливим розділом теоретичних основ технології будівельних матеріалів. Цей курс можна охарактеризувати як складову частину комплексу дисциплін, які висвітлюють різноманітні аспекти технології будівельних матеріалів як науки. До таких дисциплін належать «Мінеральні в'язучі речовини», «Технологія бетонних і залізобетонних виробів», «Технологія теплоізоляційних виробів», «Механічне обладнання підприємств промисловості будівельних матеріалів», «Теплові процеси та установки».

Виготовлення будівельних матеріалів і виробів є різновидом хімічної технології, яка почала розвиватися на рубежі XVIII і XIX століть і за короткий історичний період – 150...180 років стала в технічно розвинутих країнах однією з основних галузей народного господарства. З розвитком хімічної промисловості виникла потреба в інженерній дисципліні, яка б узагальнювала закономірності перебігу основних виробничих процесів і методи розрахунку апаратів на підставі їх раціональної класифікації.

У галузі будівельних матеріалів широко відомі праці таких видатних учених, як Б. Скрамтаєв, О. Волженський, В. Воробйов, М. Попов, Г. Горчаков, І. Риб'єв, Ф. Овчаренко, Б. Лисін, П. Ребіндер, В. Глуховський, В. Вознесенський, а також Віка, Ле Шательє, Фрейсіне (Франція), Міхаеліс, Кюль (Німеччина), Абрамс (США), Річардсон, Кульсон (Великобританія), Циборовський (Польща),

Бендик, Ласло (Угорщина). Перший підручник, у якому розглянуто процеси й апарати в технології будівельних матеріалів, був написаний українськими вченими І. Борщем, В. Вознесенським, В. Мухіним, В. Сачком і М.А. Сидоровим.

Отже, дисципліна «Процеси і апарати...» є зв'язною ланкою між загальнотехнічними і технологічними дисциплінами та створює передумови як для викладання дисциплін професійної спеціалізації з аналізом фізичних явищ, що відбуваються на окремих стадіях технологічного процесу, так і для оптимізації окремих стадій процесу загалом.

Метою дисципліни є викладання теоретичних закономірностей перебігу механічних, гідромеханічних, тепло- і масообмінних процесів, що відбуваються, зокрема, під час виготовлення будівельних матеріалів і виробів.

У результаті вивчення студенти повинні **знати**: елементарні процеси, які відбуваються на молекулярному рівні, принципи побудови і методи розрахунку апаратів і машин, використовуваних для виготовлення різноманітних будівельних матеріалів на основі виявлення аналогії різноманітних процесів і апаратів незалежно від виду сировинних матеріалів та застосування матеріалів, закономірності переходу від лабораторних процесів до промислових; уміти: правильно визначити принципи оптимізації технологічних рішень, розраховувати технологічний процес, зокрема визначати його параметри і розміри апаратів.

Розділ 1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ НАУКИ ПРО ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ

1.1. Класифікація процесів технології будівельних матеріалів

Сучасний розвиток науки про процеси і апарати дає змогу створити класифікацію процесів технології будівельних матеріалів.

Система – це сукупність взаємодійних тіл.

Процес – це послідовні і закономірні зміни в системі, які призводять до виникнення в будь-яких її елементах нових властивостей.

Технологія в промисловості будівельних матеріалів – це ряд прийомів, спрямованих на отримання з вихідних матеріалів виробничого продукту з наперед визначеними властивостями.

Апарат – будь-який пристрій, в якому відбувається технологічний процес. Деякі розглядані пристрої є типовими машинами.

Машина – це механізм або система механізмів, призначених для перетворення енергії в корисну роботу.

Для спрощення термінології в дисципліні «Процеси і апарати...» пристрої і механізми умовно вважають апаратами.

Усі різноманітні процеси технології будівельних матеріалів залежно від закономірностей їх перебігу можна за певними класифікаційними ознаками об'єднати в групи. Це дає змогу вивчати їх на основі єдиних закономірностей і застосовувати загальні методи аналізу.

Процеси технології будівельних матеріалів можна класифікувати за трьома ознаками.

Класифікація за кінетичними закономірностями: процеси поділяють на механічні, гідромеханічні, теплові, масообмінні і хімічні.

Механічні процеси описують законами механіки твердого тіла. Ці процеси застосовують для підготовки твердих вихідних матеріалів та обробки готових виробів, а також транспортування кускових та сипких матеріалів. До механічних процесів належать подрібнення, класифікація (сортування) та змішування твердих матеріалів.

Особливу групу механічних процесів становить перероблення вихідних матеріалів у вироби, а саме: формування, пресування, екструзія, лиття тощо.

Гідромеханічні процеси, швидкість яких визначається законами гідродинаміки – науки про рух рідин та газів. До таких процесів належать переміщення рідин, стискання та переміщення газів, розподіл рідких та газових неоднорідних систем в полі сил

тяжіння, відцентрованих сил, а також під тиском під час руху крізь порожнистий шар (фільтрування).

Теплові процеси відбуваються зі швидкістю, яка визначається законами *теплопередачі* – науки про способи поширення тепла. До таких процесів належать нагрівання, охолодження, випарювання, конденсація тощо. Швидкість теплових процесів значною мірою залежить від гідромеханічних умов (швидкості, режимів руху), за яких відбувається передавання тепла між теплообінними середовищами.

Масообмінні (дифузійні) процеси характеризуються перенесенням одного або кількох компонентів з однієї фази в іншу через поверхню розділу цих фаз, тобто законами масопередачі. До дифузійних процесів відносять абсорбцію, адсорбцію, сушіння тощо.

Хімічні процеси відбуваються зі швидкістю, яка визначається законами хімічної кінетики. Слід зазначити, що хімічні реакції завжди супроводжуються перенесенням маси й енергії та зміною швидкості процесів залежно від гідродинамічних умов. Загальні закономірності хімічних процесів та принципи будови обладнання для їх проведення розглядаються спеціальними дисциплінами.

За організацією можна виокремити такі процеси.

Процеси періодичної дії характеризуються тим, що деякі стадії процесу відбуваються через певні проміжки часу в одній і тій самій робочій зоні апарата, але в різний час. Прикладом періодичних процесів є виробництво будівельного гіпсу в гіпсоварильних котлах, тепловолога обробка виробів в автоклавах, випал керамічної цегли в кільцевих печах та ін.

Процеси неперервної дії характеризуються тим, що всі його стадії відбуваються одночасно, але в різних зонах апарата або в різних апаратах однієї установки. Прикладом таких процесів є сушіння і випалювання керамічних матеріалів в тунельних (обертових) печах, виготовлення залізобетонних виробів конвеєрним способом тощо.

Комбіновані процеси – це процеси, які на одних стадіях відбуваються неперервно, а на інших – періодично, наприклад,

процес виготовлення силікатних виробів. Загалом цей процес неперервний, а тепловолога обробка в автоклавах здійснюється періодично.

Основні переваги неперервних процесів:

- немає технологічних перерв під час виготовлення продукції (не витрачається час на завантаження вихідних матеріалів та вивантаження кінцевої продукції);
- стабільність режимів проведення, отже, більш стабільна якість продукції;
- можливість автоматичного регулювання та повної механізації;
- компактність устаткування, отже, менші капітальні витрати;
- більш повне використання теплової енергії і можливість використання відведеного тепла (рекуперація).

Завдяки цим чинникам підвищують продуктивність обладнання, зменшують кількість персоналу, покращують умови праці та підвищують якість продукції. Тому основним напрямом в технології виготовлення будівельних матеріалів і виробів, підвищення їх якості та зменшення собівартості є перехід від періодичних до неперервних процесів; використання нових високопродуктивних апаратів, інтенсифікації процесів та впровадження комплексної механізації й автоматизації виробництва.

Періодичні процеси не втрачають свого значення переважно на підприємствах невеликої потужності з великою номенклатурою виробів, що дає змогу досягти більшої гнучкості у використанні обладнання та зменшити капітальні витрати.

Для більш чіткої характеристики процесів використовують такі поняття та позначення:

τ – *тривалість процесу*, час, потрібний для завершення всіх стадій процесу від моменту завантаження вихідних матеріалів та вивантаження готових продуктів;

Δt – *період процесу* – час від початку завантаження вихідних матеріалів певної партії до початку завантаження вихідних матеріалів наступної партії;

$\tau/\Delta\tau$ – ступінь неперервності процесу – відношення тривалості процесу до періоду процесу.

Період періодичного процесу $\tau/\Delta\tau > 0$, ступінь неперервності $\tau/\Delta\tau < 1$, для неперервного процесу період процесу $\Delta\tau \rightarrow 0$, ступінь його неперервності – $\tau/\Delta\tau \rightarrow \infty$.

За зміною параметрів у часі процеси класифікують як стаціонарні (сталі) та нестаціонарні (змінні).

Стаціонарні процеси – це процеси, в яких кожний з параметрів, що їх характеризує, є постійним у часі. Зазвичай неперервні процеси є стаціонарними, оскільки основні параметри у певній зоні в певний момент є однаковими.

Нестаціонарні процеси – це процеси, в яких кожний із параметрів, що характеризує процес, є змінним у часі. Звичайно періодичні процеси є нестаціонарними, оскільки основні параметри процесу в певній зоні змінюються у часі.

Технологічні процеси виробництва будівельних матеріалів відбуваються відповідно до загальних фізичних, хімічних та фізико-хімічних законів. Застосування цих законів до будь-якого процесу дає змогу створити теорію процесу.

Розглядаючи процеси виробництва будівельних матеріалів, можна виділити такі принципи і закони:

- закони збереження маси й енергії;
- закони рівноваги систем;
- закони перенесення та принципи рушійної сили;
- принцип оптимізації процесу;
- принцип масштабного переходу і моделювання.

Закони збереження маси та енергії, відкриті М. Ломоносовим, А. Лавуаз'є, Д. Джоулем, в науці про процеси та апарати відіграють головну роль. Вони встановлюють, що в природі та техніці відбуваються перетворення, в яких маса та енергія всередині системи є незмінними. В науці про процеси й апарати ці закони мають форму матеріальних й енергетичних балансів.

Припустимо, що в апараті відбувається який-небудь процес. В апарат надходять компоненти з масою m_A , m_B та m_C (гази, пари, рідини або тверді тіла). Результатом процесу є вихід готових продуктів масою m_D і m_E . Очевидно, що загальна маса компонентів, які надходять до апарата, не може бути більшою або меншою від маси готових продуктів з урахуванням втрат матеріалів (внаслідок механічних втрат, неповноти реакції тощо). Це впливає із закону збереження матерії, тобто:

$$m_A + m_B + m_C = m_D + m_E + m_{B_{mp}}, \quad (1.1)$$

де $m_A...m_E$ – маса компонентів, кг; $m_{B_{mp}}$ – маса втрачених під час процесу речовин, кг.

Рівняння (1.1) має назву матеріального балансу. Для рухомих систем закон збереження маси перетворюється на рівняння нерозривності. Для двох секцій апарата площею F_1 , і F_2 , швидкості в яких w_1 і w_2 , рівняння нерозривності потоку має вигляд:

$$F_1 w_1 = F_2 w_2.$$

Кожен компонент, який надходить в апарат, є носієм певної кількості енергії. Для початку процесу може бути введена енергія ззовні. В результаті процесу може утворюватись (поглинатись) якась кількість теплоти, а деяка частина тепла зникатиме в навколишньому середовищі. На підставі закону збереження енергії (тепла) можна записати:

$$Q_A + Q_B + Q_C + Q_{BH} + Q_3 = Q_D + Q_E + Q_{Bmp}, \quad (1.2)$$

де Q_A, Q_B, Q_C – тепло, внесені компонентами А, Б, С; Q_{BH} – тепло, яке утворюється під час процесу, Дж; Q_3 – тепло, підведене ззовні, Дж; Q_D, Q_E – тепло, відведене компонентами D і E після проведення процесу, Дж; Q_{Bmp} – тепло, втрачене в зовнішнє середовище Дж.

Рівняння (1.2) називають рівнянням енергетичного (теплого) балансу. Рівняння (1.1 і 1.2) можна представляти графічно у вигляді діаграм.

Рівняння матеріального і теплового балансів лежать в основі розрахунку будь-якого процесу виробництва будівельних матеріалів.

Системи, які перебувають у стані рівноваги, не змінюють свого стану в часі. Для виведення такої системи з рівноваги потрібен вплив ззовні (механічний, тепловий тощо).

В інженерних розрахунках одним з найважливіших питань є визначення напрямку зміни в стані системи внаслідок зовнішнього впливу, дослідження якого базується на двох положеннях термодинаміки – принципі Ле Шательє та правилі фаз Гіббса.

Згідно з принципом Ле Шательє в системі, виведеній із стану рівноваги, відбуваються зміни, напрям яких протилежний напрямку сил, які виводять систему із рівноваги. Застосування цього принципу щодо конкретних процесів дає можливість визначити параметри, які можна змінювати, щоб у системі відбулися потрібні зміни.

Правило фаз Гіббса встановлює залежність між кількістю компонентів системи, кількістю фаз та ступенів свободи рівноважної системи. Згідно з правилом фаз для систем, які перебувають у стані рівноваги, сума ступенів свободи і фаз дорівнює кількості компонентів, збільшеної на два:

$$F + n = K + 2, \quad (1.3)$$

де F – кількість ступенів свободи; n – кількість фаз; K – кількість компонентів системи.

Наведене рівняння справедливе для систем з двома параметрами стану (тиску і температури). За потреби використання в ролі параметрів стану додаткових незалежних перемінних слід до правої частини рівняння (1.3) додавати по одиниці на кожний новий параметр.

Правило фаз дає можливість встановити кількість перемінних, які визначають рівновагу системи і які можна вибрати довільно.

Для інтенсифікації виробництва потрібно, щоб технологічні процеси відбувалися з найбільшою швидкістю. Кінетика багатьох технологічних процесів вивчена недостатньо, однак їх тривалість можна визначити достатньо точно.

Стосовно процесів різної фізичної природи встановлено, що їх кінетичні рівняння мають аналогічні форми, зокрема:

$$\frac{dQ}{F d\tau} = K_1 \Delta t = \frac{1}{R_1} \Delta t \quad (\text{для теплових процесів}), \quad (1.4)$$

де Q – кількість тепла, Дж; F – поверхня теплообміну, м^2 ; τ – час, с; Δt – різниця температур (рушійна сила), град.; K_1 – коефіцієнт теплопередачі, $\text{Дж}/\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{град.}$;

$$R_1 \text{ – опір переходу тепла; } R = \frac{1}{K_1}; K = \frac{1}{R};$$

$$\frac{dm}{F d\tau} = K_2 \Delta C = \frac{1}{R_2} \Delta C \quad (\text{для масообмінних процесів}), \quad (1.5)$$

де m – маса речовини, кг; F – поверхня масообміну, м^2 ; τ – час, с; ΔC – різниця концентрацій (рушійна сила), $\text{кг}/\text{м}^3$; K_2 – коефіцієнт масопередачі, $\text{м}^3/\text{с} \cdot \text{м}^2$; R_2 – опір масопередачі; $R_2 = \frac{1}{K_2}$; $K_2 = \frac{1}{R_2}$;

$$\frac{dv}{F d\tau} = K_3 \Delta P = \frac{1}{R_3} \Delta P \quad (\text{для гідродинамічних процесів}), \quad (1.6)$$

де v – об'єм фільтрату, м^3 ; F – поверхня масообміну, м^2 ; τ – час, с; ΔP – різниця тисків (рушійна сила), Па; K_3 – коефіцієнт провідності, $\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па}/\text{м}^3$;

$$R_3 \text{ – гідравлічний опір фільтруванню; } R_3 = \frac{1}{K_3}; K_3 = \frac{1}{R_3}.$$

Наведені рівняння можна привести до вигляду:

$$I = LX, \quad (1.7)$$

де I – швидкість перебігу процесу; X – рушійна сила процесу (завжди різниця будь-яких потенціалів); L – коефіцієнт провідності (величина, характерна для процесу, зворотна величині опору).

Аналіз кінетичних рівнянь дає змогу визначити загальний принцип інтенсифікації технологічних процесів: для збільшення швидкості процесу потрібно збільшити рушійну силу та зменшити опір або, що те саме, збільшити провідність.

На підставі законів кінетики визначають коефіцієнт швидкості процесу.

За отриманими результатами визначають основний розмір апарата (ємність, площу поперечного перерізу, поверхню нагріву або фазового контакту тощо). Для цього послуговуються співвідношенням:

$$S = \frac{m}{\Delta \cdot K \cdot \tau^2}, \quad (1.8)$$

де S – основний розмір апарата; M – кількість матеріалу, яку виготовляє апарат за одиницю часу; Δ – рушійна сила процесу; K – коефіцієнт швидкості процесу; τ – час.

Аналіз співвідношення (1.8) свідчить, що рушійна сила і коефіцієнт швидкості процесу є основними параметрами для визначення розмірів апаратів. Визначення цих величин є найбільш складною частиною розрахунку апаратів.

Інтенсивність процесу – це результат процесу, віднесений до одиниці часу і величини S . Із рівняння (1.8) отримуємо:

$$\frac{M}{S \cdot \tau} = K \cdot \Delta. \quad (1.9)$$

Отже, величину K можна розглядати як міру інтенсивності процесу – інтенсивність віднесена до одиниці рушійної сили.

Об'ємна інтенсивність – це інтенсивність процесу, віднесена до одиниці його загального об'єму. Чим більша об'ємна інтенсивність, тим менші розміри апарата. Але ця величина може визначати досконалість апарата тільки деякою мірою. Це пояснюється тим, що об'ємна інтенсивність апарата пов'язана з інтенсивністю процесу, але в міру збільшення коефіцієнта тривалості процесу його інтенсивність збільшується тільки до деякої межі. Збільшення коефіцієнта тривалості процесу понад оптимальну величину може призвести до зменшення рушійної сили. Тому підвищення об'ємної інтенсивності апарата завдяки збільшенню швидкості процесу не може бути самоціллю під час проектування.

В оцінці конструкції апарата або режиму його роботи визначальними повинні бути техніко-економічні показники. Оптимальним є такий апарат (або режим його роботи), який дає можливість одержати потрібний результат з найменшими витратами.

До апаратів, які застосовують для виготовлення будівельних матеріалів і виробів, висувають певні вимоги.

Технологічні вимоги: конструкція апарата повинна сприяти отриманню найкращого результату за мінімальний проміжок часу.

Експлуатаційні вимоги: апарат повинен забезпечити проведення процесу за визначених технологічних умов (температури, тиску, швидкості руху робочого середовища). Для досягнення тривалої роботи апарат підлягає плановим перевіркам його технічного стану і поточному ремонту. Конструкція апарата повинна бути такою, щоб виконувати ці роботи можна було без його тривалих зупинок.

Енергетичні вимоги (енергоємність) характеризуються витратами енергії на одиницю продукції. Апарат вважають тим більш досконалим, чим менше енергії витрачається на одиницю продукції.

Конструктивні вимоги пов'язані з проектуванням, складанням, транспортуванням і встановленням апарата. Конструкція апарата повинна бути технологічною у виготовленні, розбиранні і ремонті, зручною під час транспортування.

Економічні вимоги полягають у тому щоб витрати на виготовлення апарата й експлуатаційні витрати були мінімальними. Визначаючи економічну доцільність впровадження апарата, крім його вартості, беруть до уваги продуктивність і якість одержуваної продукції.

Вимоги з охорони і техніки безпеки праці: апарати повинні бути запроектовані і виготовлені з належним запасом міцності; оснашені запобіжними пристроями, автоматичними засобами контролю для відвернення аварійних ситуацій і дотримання безпечних умов праці. Апарати повинні бути сконструйовані згідно

з вимогами ергономіки, які полягають у тому, щоб психофізичні можливості робітника відповідали вимогам трудового процесу.

Вимоги технічної естетики полягають у тому, щоб зовнішній вигляд апарата мав раціональне колірне оформлення і створював належний мікроклімат в цеху, полегшував умови праці і сприяв отриманню продукції високої якості.

Запитання для самоперевірки

1. Які процеси і апарати належать до періодичної, неперервної і комбінованої дії?
2. Як визначають тривалість, період і ступінь неперервності процесу?
3. Що називають макрокінетикою процесу?
4. Як визначити рушійну силу процесу?
5. У чому полягає мета складання матеріальних й енергетичних балансів процесу?
6. Які класифікації основних процесів і апаратів вам відомі?
7. Які вимоги висувають до проектування апаратів для виготовлення будівельних матеріалів?

Розділ II. ОСНОВИ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ І МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ І АПАРАТІВ

Розвиток будь-якої науки починається із спостереження або експериментального дослідження. Результати дають фактичний матеріал, на підставі якого висловлюють гіпотези та розвивають теорію. Далі теоретичні висновки перевіряють на об'єктах промислового виробництва.

Науково-технічний прогрес ґрунтується на взаємозв'язку теорії й експерименту. Найбільш доцільне сполучення теорії й експерименту в наукових дослідках досягається за допомогою моделювання.

Моделювання – метод дослідження, коли замість реального або створюваного оригіналу вивчають модель (лабораторну установку), а отримані результати кількісно поширюють на апарат.

Головний результат моделювання полягає в передбаченні поведінки в промислових умовах на підставі розрахунків його параметрів за результатами, які визначені на моделі.

Методи моделювання ґрунтуються на подібності різноманітних об'єктів (процесів, фізичних явищ тощо).

Подібними називають об'єкти, у яких параметри, що визначають їх стан в просторі та часі, відрізняються тільки масштабом фізичних величин.

Сучасний стан технічного розвитку характеризується дедалі більшою складністю технологічних процесів та прискореними темпами впровадження.

Унаслідок цього ускладнюються завдання наукових розробок, а їх результати дуже швидко застарівають. За таких умов вирішального значення набуває фактор часу. Моделювання в цілому ряді випадків суттєво скорочує час освоєння нових процесів та дає змогу досягти мети простішими засобами.

До моделювання висувають такі основні вимоги:

- досліді на моделі повинні провадитися швидше і бути більш простими, зручними, економічно доцільними та безпечнішими, ніж досліді на апараті;
- повинні бути відомі однозначні правила – алгоритми, за якими виконують розрахунки параметрів апарата на підставі результатів дослідження моделі;
- структура та призначення моделі повинні узгоджуватися з основним цілям моделювання, тому що жодна модель, в принципі, не може повністю відобразити апарат, оскільки і моделювання має приблизний характер.

Згадані вимоги задовольняються, якщо в процесі моделювання дотримано основних умов подібності процесів. Умови подібності за різних способів моделювання базуються на трьох теоремах подібності. В кожному конкретному випадку обирають певний спосіб моделювання.

Усі моделі поділяють на *знакові* (символічні, уявні, розумові) та *реальні* (речовинні, матеріальні).

Знакові моделі складаються з математичних закономірностей, які пов'язують фізико-хімічні, режимні та конструктивні параметри технологічного процесу і відображають в явній формі його фізичну суть. *Такі знакові моделі складаються з математичного опису процесу і називаються математичними.* Вибір способу опису (теорія вірогідностей, диференціальні та інтегральні рівняння тощо) залежать від характеру та складності системи. *У цьому розумінні будь-яка наука є сукупністю уявних (розумових) моделей, схем об'єктів та явищ, які виникають у свідомості людини в процесі пізнання.*

Важливою *особливістю уявних моделей* є можливість описати об'єкт у різний спосіб та з різним ступенем спрощення. За деяких умов доцільно використати найпростіші моделі (наприклад, ідеальні гази, ідеальну рідину тощо).

Реальна (матеріальна) модель є фізичним об'єктом, втіленням у матеріалі, речовині, приладному оснащенні тощо. *Будь-яка реальна модель базується на уявній.*

Реальні моделі – класифікують як *фізичні, аналогові та математичні.*

Фізична реальна модель має однакову з апаратом фізичну природу і відображає його властивості.

Аналогова реальна модель ґрунтується на подібності математичного опису процесів різної фізичної природи і відображає аналогію між законами, які описують подібні явища в апараті та моделі.

Реальні математичні моделі являють собою універсальне обладнання, яке відображає математичні дії над закодованими величинами згідно із знаковим математичним описом процесу незалежно від його фізичного змісту.

Таким універсальним обладнанням є ЕОМ (електроннообчислювальні), АОМ (аналогові) машини та ЕЦОМ (електронні цифрові обчислювальні машини).

На підставі загальних принципів розрахунків технологічних процесів та апаратів відмічено, що головною метою розрахунків є визначення основних розмірів апаратів, які знаходять з кінетичних рівнянь.

Застосовуючи на практиці розрахунки кінетичних рівнянь, припускають, що кінетичні закономірності процесу вивчені в обсязі, достатньому для знаходження коефіцієнта швидкості, і знайдено рівняння, що відображає зв'язок між коефіцієнтом тривалості та величинами, які визначають перебіг цього процесу.

Процеси виготовлення будівельних матеріалів дуже складні. Для математичного опису більшості з них можна застосувати дуже складні диференціальні рівняння, які зазвичай не розв'язуються. Тому виникає потреба експериментального дослідження процесів.

Плідне дослідження процесів експериментальним шляхом можливе тільки за наявності теорії постановки експериментів та обробки їх результатів. Такою теорією є теорія подібності, що дає відповідь на питання, як потрібно організувати експеримент та обробити отримані результати таким чином, щоб їх можна було поширити на процеси, які відбуваються в аналогічних умовах.

Загальні ідеї подібності були висунуті І. Ньютоном в 1686 р., потім Ж. Бертраном і знайшли практичне застосування в суднобудуванні (праці В. Фруда), транспортуванні рідин по трубах (досліди О. Рейнольдса). Основи теорії подібності в сучасному розумінні були розроблені видатним вченим В. Кирпичовим в 1874 р. Потім його ідеї були розвинуті в працях В. Нусельта, М. Кирпичова, Г. Дьяконова, І. Бекінгема, М. Павловського, О. Крилова та інших. Їх праці дали можливість використати теорію подібності в різних галузях науки і техніки.

Застосування теорії подібності дає змогу виконати такі дії:

- визначити умови проведення експериментальних робіт, дотримання яких дає можливість зменшити кількість дослідів до мінімуму;
- визначити найменшу кількість фізичних величин, які потрібно вимірювати під час проведення дослідів, та правильно обробити отримані результати;
- визначити сфери, на які можна поширювати результати експерименту.

Висновки з теорії подібності ґрунтуються на особливих формах дослідження диференціальних рівнянь, якими описують перебіг процесу.

Складаючи диференціальне рівняння, процес розглядають не в повному обсязі і не за весь час, а в довільно вибраному елементарному обсязі протягом довільно вибраного відрізка часу.

Таким диференціальним рівнянням описують перебіг фізичного процесу в будь-якому елементарному обсязі у будь-який час.

Складаючи диференціальне рівняння, абстрагуються від особливостей процесу, тому ним описують цілий клас процесів, в межах якого фізичний закон є справедливим.

Щоб описати конкретний процес, потрібно доповнити диференціальне рівняння даними, характерними для цього процесу.

Ці додаткові дані називають умовами однозначності. Розв'язання диференціального рівняння відповідно до умов однозначності конкретизує процес.

До умов однозначності належать:

- геометричні умови, які характеризують розміри та форму апарата, в якому відбувається дослід;
- граничні умови, що характеризують взаємодію середовища із стінками апарата, в якому відбувається процес;
- фізичні властивості середовища, суттєві для досліджуваного процесу;
- початковий стан системи в момент, коли починається дослідження процесу.

Теорія подібності дає змогу поширити результати одиничного експерименту на певну групу подібних процесів в межах досліджуваного класу процесів шляхом особливого запису умов однозначності. Для цього їх задають не у вигляді певних кількісних значень окремих параметрів, а у вигляді ряду подібних значень параметрів, у формі множення відповідних параметрів на постійні числові множники.

Таким чином, в класі подібних процесів деякі процеси настільки подібні, що їх можна розглядати як одиничний процес, який відбувається зі зміною параметрів, котрі відрізняються тільки масштабом.

2.1. Аналогії

Під аналогією розуміють найбільш загальний випадок подібності без уточнення характеру залежності між моделлю та досліджуванним апаратом. Аналогія може бути заснована на якійсь якісній схожості (наприклад, з електричними, механічними або гідравлічними явищами) або на точному математичному описі, в цьому випадку аналогія становить найбільшу цінність, тому що її умови сформульовані певним чином.

Аналогічність диференціальних рівнянь, якими описують різноманітні фізичні явища, покладена в основу математичного моделювання. Наприклад, згідно із законом Ньютона потік кількості руху або імпульсу

$$I_p = -\mu g \text{grad} w \quad (2.10)$$

пропорційний градієнту швидкості і перпендикулярний напрямку потоку (різниця швидкостей внаслідок внутрішнього тертя зумовлює перенос імпульсу від шару з більш високою швидкістю до шару з меншою швидкістю).

За законом Фіка потік i -го компонента

$$I_i = -D \text{grad} C \quad (2.11)$$

пропорційний градієнту концентрації на одиниці відстані між площинами, які розміщені перпендикулярно дифузійному потоку.

Згідно із законом Фур'є тепловий потік

$$I_t = -\lambda g \text{rad} t \quad (2.12)$$

пропорційний градієнту температури.

Аналогічно за законом Ома потік електрики

$$I_g = -\frac{1}{\rho} g \text{rad} u \quad (2.13)$$

пропорційний градієнту електрики.

Таким чином, процеси перенесення кількості руху, маси або тепла можуть бути змодельовані процесом перенесення електрики.

За принципом прямої аналогії діють аналогові машини, за допомогою яких можна досліджувати процеси різної фізичної природи, оскільки в процесі розв'язання диференціальних рівнянь прямо визначають співвідношення між зміною швидкості, температури, концентрації тощо і зміною напруги електричного струму. Цінність аналогових машин в тому, що за їх допомогою можна досліджувати як неперервні процеси зміни окремих параметрів, так і періодичні (на будь-якій проміжній стадії).

2.2. Основи теорії подібності і моделювання

В основі подібності лежить лінійна закономірність $X_a = C \cdot X_m$ між двома незалежними змінними або двома відповідними величинами моделі й апарата. Якщо така закономірність є між усіма відповідними величинами промислового апарата і моделі, то подібність буде цілковою, а коли подібність справедлива тільки відносно деяких величин, вона буде частковою або приблизною.

Подібність умов однозначності охоплює геометричну подібність, подібність фізичних величин (гідравлічних, гідродинамічних, теплових, масообмінних тощо), подібність граничних та початкових умов.

Оскільки будь-який процес відтворюється в певному геометричному об'ємі, то насамперед слід досягти геометричної подібності.

У найпростішому випадку промисловий апарат, наприклад барабанну сушарку, можна охарактеризувати двома визначальними лінійними розмірами – діаметром D та довжиною L .

Якщо два апарати подібні, то геометричну подібність між ними можна виразити відношенням (рис. 2.1):

$$\frac{L_2}{D_2} = \frac{L_1}{D_1} = idem = inv = i_l = const, \quad (2.14)$$

де *inv*, або *idem*, означає «інваріантно» або «одне й те саме».

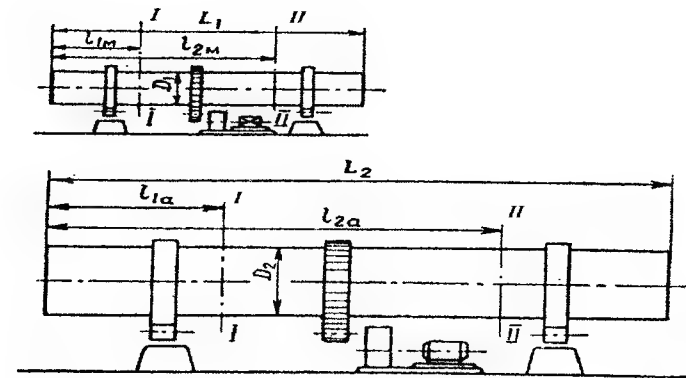


Рис. 2.1. Геометрична подібність апарата і моделі

В умовах подібності значення i_l є незмінним (однаковим) і називається *інваріантом подібності*.

Інваріанти подібності виявляють безрозмірне відношення двох будь-яких розмірів одного апарата або моделі.

Інваріанти подібності також можуть являти собою безрозмірні комплекси величин (отриманих в результаті подібного перетворення диференціальних рівнянь). *Такі інваріанти подібності називають числами, або критеріями, подібності*.

У геометрії подібність двох систем можна охарактеризувати за допомогою констант подібності, які показують, у скільки разів потрібно збільшити або зменшити одну систему до розмірів іншої; в подібних системах константи змінюються, а інваріанти залишаються однаковими.

Важливою властивістю геометричної подібності є взаємозамінність відповідних величин:

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{D_2}{D_1} = \frac{l_1a}{l_1m} = \frac{l_2a}{l_2m} = \frac{l_2a - l_1a}{l_2m - l_1m} = \frac{dla}{dlm} = C_l.$$

Якщо відношення між схожими інтервалами часу процесу у двох системах є однаковими (постійними), то спостерігається часова подібність, або синхронність (однорідність в часі).

Відповідними інтервалами часу процесу є інтервали, протягом яких завершуються аналогічні стадії процесу (завантаження вихідних матеріалів, перемішування, сушіння, випалювання, тепловолога обробка тощо).

Часова подібність характеризується відношенням:

$$\frac{\tau_a}{\tau_m} = \frac{\tau_{1a}}{\tau_{1m}} = \frac{\tau_{2a}}{\tau_{2m}} = C_\tau, \quad (2.15)$$

де C_τ – константа часової подібності (множник) – має однакове постійне значення для подібних процесів.

За $C_\tau = 1$ процеси відбуваються синхронно (однаково).

В решті випадків ($C_\tau \neq 1$) процеси належать до гомохронних.

Крім геометричної та часової подібності, має бути дотримана подібність фізичних величин. Для цього потрібна постійність відношень значень фізичних величин (швидкості, густини, температури, тиску, в'язкості тощо), тобто:

$$\frac{w_{1a}}{w_{1m}} = \frac{w_{2a}}{w_{2m}} = \frac{w_{na}}{w_{nm}} = C_w; \quad (2.16)$$

$$\frac{\rho_{1a}}{\rho_{1m}} = \frac{\rho_{2a}}{\rho_{2m}} = \frac{\rho_{na}}{\rho_{nm}} = C_\rho \quad (2.17)$$

і тому подібне.

У розгляданому випадку w_{1a} , w_{2a} , ρ_{1a} , ρ_{2a} – величини швидкості, густини матеріалів, які діють в апараті; w_{1m} , w_{2m} , ρ_{1m} , ρ_{2m} – значення цих матеріалів, які діють в моделі.

Для векторних величин має бути дотримана паралельність напрямків, тобто

$$w_a \parallel w_m. \quad (2.18)$$

Слід також зауважити, що значення констант C_l, C_τ, C_ρ, C_w відрізняються одна від одної, тобто для кожної з них є свій множник перетворення.

Подібність граничних умов визначається тим, що всі значення величин, які характеризують ці умови для відповідних точок у певні відрізки часу, знаходяться в постійних (однакових) співвідношеннях.

Подібність початкових умов означає, що в момент, коли починається дослідження процесу, спостерігається подібність всіх фізичних величин, які характеризують процес.

Умови однозначності є індивідуальною відзнакою різноманітних процесів одного класу. Саме за цим відзнакам розрізняють між собою процеси. Якщо всі індивідуальні відзнаки подібні, то й процеси також подібні.

Перша теорема подібності має назву теореми Ньютона-Бертрана. Вона сформульована таким чином, що для подібних систем завжди можуть бути знайдені такі безрозмірні комплекси фізичних величин, які для відповідних точок системи будуть однаковими, тобто подібні явища характеризуються чисельно однаковими критеріями подібності.

Такі умови легко знайти, якщо проаналізувати будь-яку конкретну функціональну залежність, наприклад другий закон механіки (сила дорівнює добутку маси на прискорення):

$$f = m \frac{dw}{d\tau}, \quad (2.19)$$

де f – сила; m – маса; w – швидкість; τ – час; $\frac{dw}{d\tau}$ – прискорення.

Для апарата:

$$f_a = M_a \frac{dw_a}{d\tau_a}$$

Для моделі:

$$f_m = M_m \frac{dw_m}{d\tau_m}. \quad (2.20)$$

У разі подібності фізичні величини однієї системи можна виразити через величини іншої (для відповідних точок) за допомогою констант подібності:

$$\frac{m_a}{m_m} = C_m; \quad \frac{w_a}{w_m} = C_w; \quad \frac{d\tau_a}{d\tau_m} = C_\tau.$$

Відношення сил, які зумовлюють рух, повинно бути однаковим з відношенням інерційних сил, що при цьому виникають

$$\frac{f_a}{f_m} = \frac{M_a \frac{dw_a}{d\tau_a}}{M_m \frac{dw_m}{d\tau_m}}; \quad \frac{f_a}{f_m} = \frac{M_a dw_a d\tau_m}{M_m dw_m d\tau_a}.$$

Відношення прирісту величин, які входять в константи подібності, можна замінити відношеннями самих величин, тобто можна відкинути знаки диференціалів:

$$\frac{f_a}{f_m} = \frac{M_a w_a \tau_m}{M_m w_m \tau_a}, \text{ або } C_f = \frac{C_m C_w}{C_\tau},$$

звідки $C_f \cdot C_\tau = C_m C_w$. Розділимо ліву частину на праву, отримаємо:

$$C = \frac{C_f C_\tau}{C_m C_w} = 1. \quad (2.21)$$

Співвідношення (2.21) свідчить, що вибір констант подібності для змінних величин не є випадковим. У розгляданому випадку воно пов'язує чотири незалежних константи, тому довільно можна вибрати тільки три з них, а значення четвертої визначають із залежності (2.21). Це співвідношення називається *індикатором подібності*.

Перепишемо вираз (2.21) у вигляді:

$$C_f C_\tau = C_m C_w.$$

Замінивши константи подібності у виразі відношеннями відповідних величин, отримаємо: $\frac{f_a \cdot \tau_a}{f_m \cdot \tau_m} = \frac{m_a \cdot w_a}{m_m \cdot w_m}$, якщо обидві частини рівності перемножимо на $f_m \tau_m$ і поділимо на $m_a w_a$, то отримаємо:

$$\frac{f_a \cdot \tau_a}{f_m \cdot \tau_m} \cdot \frac{f_m \cdot \tau_m}{m_a \cdot w_a} = \frac{m_a \cdot w_a}{m_m \cdot w_m} \cdot \frac{f_m \cdot \tau_m}{m_a \cdot w_a}, \text{ або } \frac{f_a \cdot \tau_a}{m_a \cdot w_a} = \frac{f_m \cdot \tau_m}{m_m \cdot w_m}.$$

Отже, отримали безрозмірний комплекс величин, значення якого для відповідних точок обох систем будуть однакові. Цей комплекс величин називають критерієм Ньютона і позначають так:

$$\frac{f\tau}{mw} \equiv idem \equiv N_e,$$

або, зважаючи, що $\tau = \frac{l}{w}$, отримуємо:

$$\frac{fl}{mw^2} \equiv N_e \quad (2.22)$$

Позначення *idem* слід розуміти як «один і той самий» або «однаковий».

Першу теорему подібності можна сформулювати таким чином: *для подібних систем індикатор подібності дорівнює одиниці*.

Для визначення критеріїв подібності варто скористатися більш простим (формальним) підходом для перетворення диференціального рівняння: *критерій подібності можна визначити шляхом поділу однієї (лівої або правої) частини диференціального рівняння на другу, при цьому слід відкинути знаки математичних операторів*.

Перша теорема показує, які фізичні величини треба контролювати під час експерименту, результати котрого потрібно аналізувати: *слід вимірювати ті величини, які входять в критерій подібності*.

Крім критеріїв подібності, які отримують шляхом перетворення диференціальних рівнянь, застосовують критерії, які являють собою відношення геометричних величин. Вони називаються параметричними (діаметр і довжина труби, периметр тощо).

Лінійний розмір, який входить в критерій подібності і є найбільш характерним для системи, називається *визначальним розміром*.

Аналогічно тому, як був знайдений вираз для критерію Ньютона, шляхом подібного перетворення відповідних диференціальних рівнянь можна отримати решту критеріїв подібності.

Друга теорема подібності була доведена Бекінгемом, Фрідманом і Афанасьєвою-Еренфест. Згідно з цією теоремою розв'язання будь-якого диференціального рівняння, яке пов'язує між собою змінні величини, може бути представлене у вигляді залежності між безрозмірними комплексами цих величин, тобто між критеріями подібності.

Якщо позначити критерії подібності як $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n$, то розв'язання диференціального рівняння можна представити в загальному вигляді:

$$\Phi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n) = 0. \quad (2.23)$$

Рівняння такого типу називають рівнянням в узагальнених змінних, або *критеріальними рівняннями*.

Таким чином, друга теорема подібності містить відповідь на запитання, як саме треба обробити отримані експериментальні дані, або в якій формі може бути отримане рішення системи диференціальних рівнянь.

Слід зазначити, що критерії подібності, які входять в залежність (2.23), не рівноцінні. Критерії подібності, складені з фізичних величин, які входять в умови однозначності, належать до визначальних. Критерії, складені із фізичних величин, які не є обов'язковими для однозначної характеристики процесу і залежать від умов однозначності, належать до визначуваних.

Функціональну залежність (2.23) зручно представляти в такому вигляді, щоб після знаходження визначуваних критеріїв можна було знайти значення визначального критерію, а потім з нього – чисельне значення шуканої фізичної величини. Отже, якщо визначальний критерій позначити як π_1 , то:

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n). \quad (2.24)$$

Третя теорема подібності (доведена Кирпичовим і Гухманом) обернена першій: *подібні ті явища або системи, які описують однаковими рівняннями зв'язку й умови однозначності яких подібні*.

Подібність умов однозначності досягається рівністю визначальних критеріїв, якщо явища або процеси якісно однакові, а якісно однаковими є процеси або системи, математичний опис яких аналогічний.

Таким чином, у третій теоремі подібності сформульовано необхідні і достатні умови для подібності процесів. За методами теорії подібності можна переносити результати експерименту, отримані на моделі, на клас подібних процесів. Для цього потрібно скласти математичний опис процесу у вигляді системи диференціальних рівнянь й умов однозначності. Потім слід виконати подібне перетворення системи рівнянь й отримати критерії подібності, після чого за допомогою моделі виявити конкретну залежність між критеріями подібності. Отримане узагальнене рівняння справедливе для всіх подібних процесів в межах зміни визначальних критеріїв подібності.

2.3. Метод аналізу розмірностей фізичних величин

Досліджуючи складні явища або процеси, у деяких випадках не вдається скласти повний математичний опис у вигляді системи диференціальних рівнянь, а можна тільки в загальному вигляді представити залежність між фізичними розмірностями та геометричними параметрами, які характеризують процес. Вигляд такої залежності можна знайти за результатами аналізу розмірностей фізичних величин, які ввійшли в рівняння. Цей метод дає змогу виразити загальну функціональну залежність для будь-якого процесу у вигляді рівняння зв'язку між точно визначеною кількістю безрозмірних комплексів, складених з фізичних величин з визначеною розмірністю і виражених за допомогою однакових одиниць вимірювання.

Сукупність розмірностей зазвичай записують у вигляді формули розмірності, яка може бути і рівнянням, і рівнянням у символах.

Наприклад, для визначення швидкості формулу розмірності можна записати у вигляді $W = \frac{l}{\tau}$ або $[w] = LT^{-1}$.

Для визначення активної сили маємо $[F] = M[A] = MLT^{-1}$, для роботи – $[A] = [F]L = ML^2T^{-2}$.

Згідно з π -теоремою (теоремою Бекінгема) будь-яка залежність, яка пов'язує між собою n фізичних розмірностей, серед яких m розмірностей є первинними, може бути перетворена на критеріальне рівняння, яке пов'язує $(n - m)$ безрозмірних критеріїв подібності.

π -теорема має велике значення для проведення експериментального дослідження, оскільки дає змогу виявляти зв'язок не між окремими фізичними змінними величинами, а між деякими їх безрозмірними співвідношеннями. При цьому кількість змінних величин зменшується на кількість використаних первинних розмірностей, що значно спрощує умови експерименту.

Слід також зазначати, що у використанні методу аналізу розмірностей обов'язковою умовою є те, щоб всі фізичні величини були виражені в одній системі одиниць вимірювання.

Запитання для самоперевірки

1. Які системи називають подібними?
2. Охарактеризуйте роль аналогій в експериментальному дослідженні.
3. У чому полягає суть геометричної подібності?
4. Яка різниця між константами й інваріантами подібності?
5. Назвіть умови однозначності.
6. Який взаємозв'язок між індикатором подібності й подібністю системи?

7. Яка принципова різниця між визначенням критеріїв подібності за методом аналізу розмірностей фізичних величин і визначенням згідно з теоремами подібності?
8. У чому полягає практичне значення π -теореми?

Розділ III. МЕХАНІЧНІ ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ

Процеси подрібнення є одними з основних у виробництві більшості будівельних матеріалів. Актуальність досліджень в цій галузі визначається значним впливом ступеня подрібнення на технологічні властивості тонкомелених порошків і великими обсягами виробництва матеріалів. Причому енерговитрати на подрібнення становлять 50...80% собівартості виготовлення матеріалів.

Подрібнення твердих матеріалів виконують з метою збільшення поверхні твердих частинок. У міру розвитку промисловості вимоги до дисперсності матеріалів постійно підвищують. Особливо високі ступені подрібнення повинні мати порошки, призначені для наповнення пластмас, гуми, паперу, картону, керамічних виробів, лакофарбових та інших матеріалів.

Процеси подрібнення і сортування матеріалів за крупністю є одними з основних у технології виготовлення будівельних матеріалів. Вони мають велике значення для досягнення високої якості будівельних матеріалів, зважаючи на вирішальний вплив зернового складу на здатність ущільнюватися під час формування, сушіння, випалювання та на довговічність виробів.

Процеси подрібнення умовно поділяють на дроблення (крупне, середнє і дрібне) та помел (грубий, середній, тонкий і надтонкий). Залежно від виду прикладеного зусилля розрізняють такі способи подрібнення: роздавлення, розколювання, розпилювання, стирання та удар (рис. 3.1).

У більшості випадків ці види зусиль діють на матеріал комбіновано; при цьому основне значення має один з них, що зумовлено конструкцією машини для подрібнення. Залежно від фізико-механічних властивостей і розмірів кусків вихідного матеріалу обирають методи подрібнення.

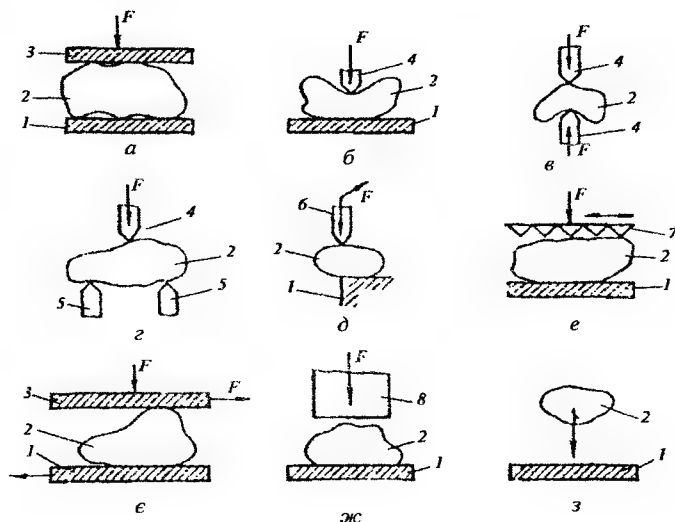


Рис. 3.1. Способи подрібнення:

a – роздавлення; *б* – розколювання з опорною плитою; *в* – розколювання між клиноподібними робочими елементами; *г* – розламування; *д* – різання; *е* – розпилювання; *ж* – стирання; *з* – подрібнення внаслідок стисненого удару; *1* – опорна плита; *2* – подрібнюваний матеріал; *3* – натискна плита; *4* – клиноподібний робочий інструмент; *5* – опори; *6* – ніж; *7* – пила; *8* – ударний інструмент

Матеріал	Метод подрібнення
міцний і крихий	роздавлення, удар
міцний і в'язкий	роздавлення
крихий, середньої міцності	удар, розколювання, стирання
в'язкий, середньої міцності	стирання, удар, розколювання

Подрібнення матеріалів звичайно здійснюють сухим способом, помел часто виконують мокрим способом. За мокрого подрібнення немає пилоутворення, полегшується транспортування мелених матеріалів.

Для помелу застосовують молотні тіла (рис. 3.2) у вигляді сталевих куль (3.2, *a*), коротких циліндрів (цильпебс) (3.2, *б*), двоввігнутих куль (3.2, *в*), кубічної форми (3.2, *г*), зрізаних конусів (3.2, *д*), пружин (3.2, *е*), еліпсоїдів (3.2, *ж*).



Рис. 3.2. Типи молотних тіл

Результат подрібнення оцінюють за ступенем подрібнення. Лінійний ступінь визначається за формулою:

$$i = \frac{D_{в.м}}{d_{п.м}}, \quad (3.1)$$

де i – лінійний ступінь подрібнення; $D_{в.м}$ – середній характерний розмір матеріалу до подрібнення, м; $d_{п.м}$ – середній характерний розмір матеріалу після подрібнення, м.

Характерним лінійним розміром куска кулястої форми є діаметр, кубічної – довжина ребра, а розмір куска неправильної форми можна визначити як середню геометричну величину:

$$d = \sqrt[3]{lbh}, \quad (3.2)$$

де l, b, h – максимальні розміри куска за трьома взаємно перпендикулярними напрямками.

Для розрахунку середнього характерного розміру сипких матеріалів їх розділяють на фракції. Потім в кожній фракції визначають середній характерний розмір як півсуму максимального і мінімального розмірів кусків:

$$d_{сеп} = \frac{d_{max} + d_{min}}{2}. \quad (3.3)$$

На практиці максимальний розмір кусків визначається розміром отворів сита, крізь які проходить весь матеріал фракції, а мінімальний розмір – величиною отворів сита, на якому фракція залишається.

Середній характерний середньозважений розмір зерен матеріалу в суміші визначають за формулою:

$$d_{срзв} = \frac{d_{ср1}m_1 + d_{ср2}m_2 + \dots + d_{срn}m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n}, \quad (3.4)$$

де $d_{ср1}, d_{ср2}, \dots, d_{срn}$ – середні характерні розміри зерен кожної фракції; $m_1, m_2, \dots, m_n$ – масовий вміст кожної фракції, %.

Визначені в такий спосіб середні характерні розміри кусків $D_{в.м}$ до подрібнення і $d_{п.м}$ – після подрібнення підставляють для розрахунку у формулу (3.1).

У технології будівельних матеріалів в більшості випадків потрібні високі значення ступеня подрібнення. Дуже часто розміри кусків вихідного матеріалу дорівнюють 1500 мм, тоді як в технологічних процесах використовують порошки. розміри частинок яких становлять частку мікрона. Таких високих значень ступеня подрібнення досягають, подрібнюючи матеріал за декілька стадій, оскільки за одну стадію неможливо отримати продукт потрібної крупності.

Залежно від розмірів кусків вихідного і подрібненого матеріалів розрізняють види подрібнення (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Класифікація видів подрібнення

Вид подрібнення	Характерний розмір кусків (частинок) матеріалу		Ступінь подрібнення, i
	до подрібнення, $D_{\max}$, мм	після подрібнення, $d_{\min}$, мм	
Дроблення:			
Круше	1500...300	300...100	2...5
Середнє	300...100	50...25	5...10
Дрібне	50...25	5...1	10...50
Помел:			
Грубий	5...1	0,4...0,01	10...50
Тонкий	0,4...0,01	0,004...0,001	~ 100
Надтонкий	0,004...0,001	< 0,001	~ 200

За призначенням апарати для подрібнення умовно поділяють на дробарки *крупного, середнього і дрібного подрібнення*, млини *тонкого і надтонкого помелу*.

Подрібнення, особливо помел, дуже енергоємні процеси, тому треба прагнути до зменшення маси перероблюваного матеріалу, керуючись принципом – не подрібнювати «нічого зайвого». Відповідно до цього принципу з вихідного матеріалу доцільно видалити куски, менші за розміром, ніж той, до якого подрібнюється матеріал.

Видалення «дрібняку» виконують шляхом ситової класифікації, тобто розподілу сипкого матеріалу на фракції, просіюючи крізь одне або декілька сит. При цьому зменшуються витрати енергії на подрібнення, стає можливим збільшення продуктивності подрібнювача, отримання більш однорідного за розмірами зерен кінцевого продукту.

Дробарки і млини працюють у відкритому та закритому циклах. За відкритого циклу (рис. 3.2) матеріал подрібнюють в апараті один раз. Відкритий цикл застосовують для крупного і середнього дроблення.



Рис. 3.2. Схеми циклів подрібнення:

a – відкритий цикл; b – замкнутий цикл з попередньою класифікацією;
1 – класифікатор; 2 – подрібнювач

За наявності «дрібняку» у вихідному матеріалі його попередньо класифікують, при цьому «дрібняк» не подають в подрібнювач, а направляють до кінцевого продукту. У замкнутому циклі матеріал

неодноразово проходить через подрібнювач. Подрібнений продукт подається на класифікатор, в якому зерна, більші за заданий розмір, відокремлюються і повертаються в подрібнювач. Тому перевірну класифікацію дуже часто поєднують з попередньою класифікацією вихідного матеріалу.

Замкнутий цикл широко застосовують для тонкого помелу. При цьому завдяки попередній і перевірній класифікації в подрібнювач не попадає «нічого зайвого». За багатостадійного подрібнення подрібнювач на останній стадії працює в замкнутому циклі.

3.1. Теоретичні основи подрібнення твердих матеріалів

У технологічному процесі мета подрібнення полягає в тому, щоб перетворити крупні куски вихідного матеріалу в дрібні і дуже дрібні частинки. По суті, в результаті тонкого помелу утворюється величезна поверхня матеріалу, яка має поверхневу енергію і залежить від поверхневого натягу σ подрібненого матеріалу. Величина σ чисельно дорівнює роботі, яку треба виконати для утворення одиниці вільної поверхні. Тому якщо поверхня збільшиться на величину ΔS , то робота A , потрібна для її утворення, пропорційна $\sigma \Delta S$.

Процес руйнування необоротний, внаслідок чого тільки дуже незначна частина роботи руйнування накопичується в подрібненому матеріалі у вигляді вільної поверхневої енергії. Значна частина роботи, яка витрачається на руйнування, перетворюється в теплову. Це відбувається завдяки енергії, яка накопичується за пружних і пластичних деформацій, що передують руйнуванню твердого тіла. Крім того, аморфізація поверхневих шарів тонкомелених частинок потребує великих питомих витрат енергії, набагато більших, ніж приріст поверхневої енергії. Тому згідно з теорією Реттінгера витрата роботи A на утворення нової поверхні S дорівнює:

$$A = K_p S, \quad (3.5)$$

де K_p – коефіцієнт пропорційності, який визначає кількість роботи на утворення одиниці поверхні.

Відомо, що деформація твердого тіла за стискання, згідно із законом Гука, дорівнює:

$$f = \frac{PL}{EF}, \quad (3.6)$$

при цьому витрачається робота

$$A = \frac{P}{2} \cdot f = \frac{P^2 L}{2EF}, \quad (3.7)$$

де P – навантаження на матеріал; L – довжина матеріалу; F – площа поперечного перерізу матеріалу; E – модуль пружності.

Унаслідок навантаження в матеріалі виникає напруження:

$$R = \frac{P}{F}. \quad (3.8)$$

Після підстановки R в залежність (3.7) і заміни значення $\frac{R^2}{2E}$ на K_k отримаємо:

$$A = \frac{R^2 FL}{2E} = \frac{R^2 V}{2E} = K_k V, \quad (3.9)$$

де V – об'єм матеріалу; K_k – коефіцієнт пропорційності, який визначає кількість роботи, потрібної для утворення одиниці об'єму подрібненого матеріалу.

Залежність (3.9) була сформульована В. Кирпичовим в 1874 р. і Ф. Кіком у 1885 р. Вона суттєво відрізняється від рівняння П.Реттінгера, оскільки робота на подрібнення пропорційна в першому випадку знову утворюваній поверхні, а в другому – пропорційна зміні об'єму деформованого матеріалу.

Згідно з теорією Ф. Бонда (1952) робота, потрібна для подрібнення матеріалу від розміру d_1 до d_2 , дорівнює різниці кількості сумарної енергії, потрібної для доведення матеріалу від теоретично нескінченно-великого розміру до d_1 і до d_2 . За цією теорією енергія руйнування спочатку розподіляється в об'ємі

матеріалу і пропорційна d_1^3 , а з моменту утворення тріщини енергія концентрується на її поверхні і пропорційна d_1^2 .

Таким чином, теорія Ф. Бонда поєднує теорії П. Реттінгера і В. Кирпичова – Ф. Кіка і має такий вигляд:

$$A = K_B \left(\frac{1}{\sqrt{d_2}} - \frac{1}{\sqrt{d_1}} \right) = K_B^{2,5}, \quad (3.10)$$

де K_B – коефіцієнт пропорційності.

Аналіз закономірностей (3.6, 3.9, 3.10) свідчить, що роботу, потрібну для подрібнення одиничного куска з відповідним ступенем подрібнення, можна представити в узагальненому вигляді:

$$A = K_n D^m, \quad (3.11)$$

де m – змінюється в межах від 2 до 3, а K_n характеризує руйнівне зусилля від K_p до K_B залежно від ступеня подрібнення.

За П. Ребіндером, робота руйнування твердого тіла складається з роботи пружних і пластичних деформацій в об'ємі тіла ΔV , пропорційних цьому об'єму, і дорівнює $K \Delta V$, і з роботи утворення вільної поверхневої енергії поверхні $\sigma \Delta S$:

$$A = \sigma \Delta S + K \Delta V. \quad (3.12)$$

У разі подрібнення крупного куска з малим ступенем подрібнення можна знехтувати роботою, яка витрачається на утворення нової поверхні, через її незначну величину. В такому випадку рівняння (3.12) має вигляд:

$$A = K \Delta V.$$

Рівняння виражає гіпотезу подрібнення В. Кирпичова – Ф. Кіка. При цьому повна робота подрібнення визначається для випадку крупного подрібнення, оскільки береться до уваги тільки робота з деформації об'єму матеріалу.

Якщо подрібнення виконують з великим ступенем помелу, то в рівнянні (3.12) можна знехтувати роботою з деформування об'єму через її відносно малу величину, і рівняння (3.12) перетворюється на рівняння П. Реттінгера:

$$A = K_p S.$$

Гіпотезу П. Реттінгера можна застосовувати для приблизного визначення повної роботи тільки в разі великого ступеня подрібнення (тонкий помел), оскільки в ній береться до уваги робота з утворення нових поверхонь.

Таким чином, використовуючи запропоновані гіпотези, можна спланувати організацію процесів подрібнення і в першому наближенні визначити витрати енергії на ці процеси.

3.2. Класифікація і принципи роботи подрібнювачів

У промисловості будівельних матеріалів для подрібнення матеріалів використовують машини і апарати, що характеризуються великою різноманітністю конструктивних схем. Залежно від ступеня подрібнення їх поділяють на дробарки і млини. За формою і видом робочих органів дробарки і млини поділяють на групи (табл. 3.2).

Ефективність подрібнювачів оцінюють за витратами енергії на одиницю подрібненого матеріалу за формулою:

$$E = \frac{A}{M}, \quad (3.13)$$

де A – енергія (робота), яка витрачається на подрібнення (помел) матеріалу; M – кількість (маса, об'єм) подрібненого матеріалу.

Таблиця 3.2

Класифікація подрібнювачів

Подрібнення	Характерний розмір кусків після подрібнення, мм	Апарати	Принципова схема апаратів	Вид механічного зусилля руйнування	Продуктивність, т/год	Тип гірської породи
1	2	3	4	5	6	7
Крупне ($i = 2 \dots 5$)	50	Щокова дробарка		Стиск	10...30	Міцні
		Конусні дробарки		Стиск, стирання	50...70	Міцні
		Валкові дробарки		Стиск, стирання	40...60	Середньої міцності
Середнє ($i = 5 \dots 10$)	5...50	Молоткова дробарка		Удар, стирання	8...12	Середньої міцності
		Дробарка ударної дії		Удар, стирання	4...6	Середньої міцності
		Черв'ячна дробарка		Стиск	4...6	Середньої міцності
		Бігуни		Стиск, стирання	4...6	Міцні і середньої міцності
Тонке ($i = 10 \dots 50$)	0,1...5	Валковий млин (див. валкова дробарка)		Стиск, стирання	5...8	Міцні і середньої міцності
		Кульковий млин		Удар, стирання	5...8	Міцні і середньої міцності
		Ударно-стрижневий млин (дезінтегратор)		Удар, стирання	6...8	Середньої міцності, міцні

Закінчення табл. 3.2

1	2	3	4	5	6	7
		Повітряно-струминний млин		Стиск, стирання	0,5...1	Середньої міцності
Тонке ($i = 50$)	0,1	Вібраційний млин		Стиск, стирання	1,5...2,5	Середньої міцності
		Колодний млин		Стиск, стирання	1,5...2,5	Середньої міцності

Гірські породи за міцністю на стиск поділяють на три групи:

- тверді абразивні породи (граніти, базальти, пісковики та ін.), які мають міцність на стиск в межах від 80 до 400 МПа;
- міцні однорідні малоабразивні породи (вапняки, доломіти та ін.), які мають міцність на стиск в межах від 100 до 250 МПа, незасмічені або малозасмічені глинистими та іншими домішками;
- малоабразивні породи середньої міцності, які мають міцність на стиск в межах 30...100 МПа, засмічені глинистими та іншими вкрапленнями слабких порід.

Твердість матеріалів можна визначати, порівнюючи з мінералами за шкалою Мооса. Класифікувати гірські породи за твердістю можна також за шкалою М. Протогдіяконова, згідно з якою породи поділяють на 10 категорій.

Встановлено, що чим більша твердість порід, тим менший їх опір удару внаслідок великої швидкості деформації твердих матеріалів.

Структура матеріалу (кристалічна, аморфна, волокниста, пориста) також впливає на процес подрібнення і вибір типу подрібнювача.

3.3. Теоретична і фактична міцність матеріалів

Останнім часом значну увагу приділяють дослідженню міцності кристалічних твердих матеріалів. Це дає можливість зрозуміти природу важливих закономірностей, які характеризують деякі механічні, теплові та інші властивості твердих тіл.

Теоретична міцність кристалічних твердих матеріалів та їх твердість залежать від сил взаємодії іонів, атомів і молекул, які утворюють ґратку кристала. Залежно від міжмолекулярних сил біля центрів рівноваги розглядають такі типи міжатомних зв'язків: іонний, атомний, молекулярний і металічний (рис. 3.3).

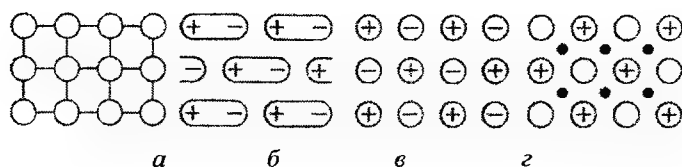
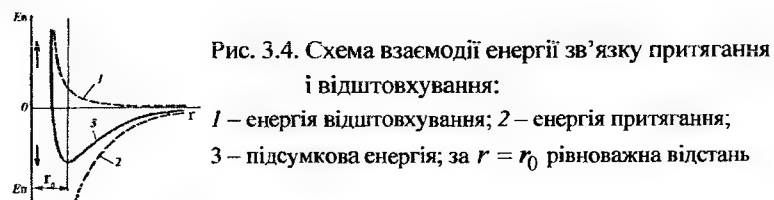


Рис. 3.3. Основні типи кристалічних структур:
а – атомна; б – молекулярна; в – іонна; г – металічна

Розглянемо сили, які діють в іонній ґратці. У ній кожен іон оточений іонами протилежного заряду, і сили електростатичного притягання урівноважуються квантово-механічними силами відштовхування, зміна значень яких схематично представлена на рис 3.4.



За $r = r_0$ ці сили зрівноважують одна одну. Будь-яка зміна цієї відстані між іонами (наприклад, внаслідок механічної або теплової дії) порушує рівність сил притягання і відштовхування. Роботу, потрібну для руйнування кристалічної ґратки, називають *енергією кристалічної ґратки*. Великою енергією характеризуються речовини з щільною ґраткою. Чим більша енергія ґратки, тим важче її зруйнувати. Тверді тіла з великою поверхневою енергією також мають значну твердість і міцність (табл. 3.3).

Поверхнева енергія і міцність деяких матеріалів

Матеріал	Поверхнева енергія, А, Дж/м ²	Модуль пружності, Е, МПа	Міцність за розтягу, МПа	
			теоретична	фактична
Кам'яна сіль	0,115	$0,44 \cdot 10^5$	$4,35 \cdot 10^3$	$0,1 \cdot 10^2$
Кремнеземисте скло	0,56	$0,73 \cdot 10^5$	$10 \cdot 10^3$	$0,15 \dots 0,20 \cdot 10^2$
Сталь	2,0	$2 \cdot 10^5$	$30 \cdot 10^3$	$3 \dots 5 \cdot 10^2$
Залізо	2,0	$2,05 \cdot 10^5$	$7,75 \cdot 10^4$	$0,0 \dots 5,0 \cdot 10^2$
Мідь	1,65	$1,96 \cdot 10^5$	$4,1 \cdot 10^4$	$2,2 \cdot 10^3$
Алмаз	5,4	$1,23 \cdot 10^6$	$2,1 \cdot 10^4$	$6,1 \cdot 10^4$

Для твердих тіл зі складною структурою навіть за відомої міцності зв'язків між двома суміжними системами перехід від енергії взаємодії між ними до енергії твердого тіла дуже складний. Тому виконання достатньо точних розрахунків теоретичної міцності поки що є неможливим.

Найбільш успішно задача з визначення енергії кристалічної ґратки іонних кристалів уперше була розвязана А. Капустинським:

$$E = C \frac{W_k W_a}{r_k + r_a} \sum n, \quad (3.14)$$

де C – постійна, яка залежить від відстані між іонами; W_k, W_a – валентність катіона і аніона; r_k, r_a – радіус катіона і аніона; $\sum n$ – кількість іонів, які утворюють молекулу.

Полянці запропонував визначати теоретичну міцність за формулою:

$$R^2 = \frac{2E\sigma}{a} \text{ або } R = \sqrt{\frac{2E\sigma}{a}}, \quad (3.15)$$

де E – модуль пружності; σ – поверхнева енергія твердої фази; a – відстань між складовими кристалічної ґратки.

В. Олександров і С. Журков рекомендують визначати міцність кристалічних матеріалів за формулою:

$$R = \frac{2\sigma}{\epsilon_k \cdot r}, \quad (3.16)$$

де σ – поверхнева енергія; ϵ_k – критична питома деформація; r – середній радіус частинок, які утворюють кристалічну ґратку.

Орован запропонував теоретичну міцність твердих тіл визначати за формулою:

$$R = \left(\frac{E\sigma}{r_0} \right)^{0,5}, \quad (3.17)$$

де E – модуль пружності; σ – поверхнева енергія; r_0 – відстань між атомами.

Ідеальні кристали складаються із правильно розміщених у всіх напрямках атомів або молекул. В кожному такому кристалі є характерна для нього структурна одиниця, або елементарна комірка, яка в трьох вимірах утворює його кристалічну ґратку.

Численними дослідженнями встановлено, що структура реальних кристалів майже завжди відрізняється від правильної побудови. Відхилення реальних кристалів від ідеальних дуже різноманітні.

Будь-яке відхилення від ідеальної структури називається *дефектом*. Дефекти поділяють на *точкові*, *лінійні*, *поверхневі* (або *плоскі*) та *об'ємні*.

До точкових дефектів належать порушення, нескінченно малі в трьох вимірах. До них відносять вакансії – розміщення атомів між вузлами ґратки. Один з видів такого порушення – *дефект Френкеля*, який виникає внаслідок переходу атома з вузла ґратки в міжвузловий простір. Другий тип утворення вакансії в кристалі – *дефект Шоттки* виникає через переміщення атома з нормального положення у вузлі кристалічної ґратки на поверхню кристала. Точкові дефекти є центрами розширення і стискання ґратки. Вакансію на рисунках і в записі хімічних реакцій схематично позначають квадратом (рис. 3.5).

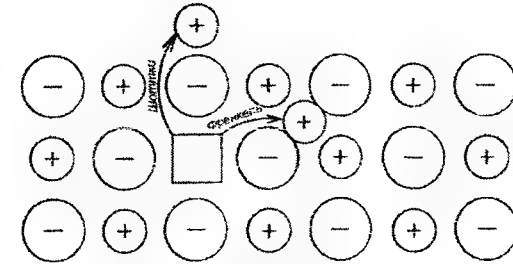


Рис. 3.5. Схема утворення дефектів кристалічної ґратки

Лінійні дефекти кристалічної ґратки, які порушують правильне чергування атомних площин, що виникають в процесі утворення кристала, або в результаті наступних механічних дій, або з інших причин, називають *дислокацією*. Поняття дислокації запроваджено Прандтлем і Делінгером. Ідея, згідно з якою пластична деформація в кристалах відбувається внаслідок ковзання дислокацій, була одночасно опублікована в 1934 р. Тейлером, Орованом і Полянці.

У процесі ковзання елементарні комірки верхньої частини кристала зсуваються на одну міжатомну відстань між системами. Але між рухомою і нерухомою ділянками утворюється лінія неузгодження комірок. Процес ковзання викликає рух дислокації в кристалі, який призводить до розширення поверхні зсуву. Пластична деформація (рис. 3.6) є результатом неперервного генерування і руху таких дислокацій.

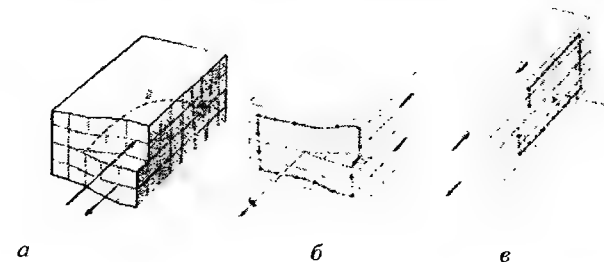


Рис. 3.6. Дислокації:

а – утворена внаслідок зсуву. Дислокаційна петля Д являє собою лінію неузгодження ґратки; б – гвинтова; в – крайова (лінійна). Зміщення відбувається паралельно гвинтовій дислокації, але перпендикулярно крайовій

Частина дислокаційної петлі розміщується паралельно, а частина – перпендикулярно до напрямку руху. Перпендикулярну частину дислокаційної петлі називають *крайовою дислокацією*, а *паралельну частину* – *звинтовою*. Решта петлі являє собою комбінацію цих двох типів дислокацій. Таким чином, через наявність дислокацій кристал стає дуже пластичним. Проходження дислокації через кристал рівноцінне зсуву однієї частини кристала відносно другої.

Поверхня кристалів дуже часто має мозаїчну структуру, тобто складається з окремих блоків (частин), відділених один від одного тріщинами або площиною, яка належить різним неоднаково орієнтованим кристалам (рис 3.7).

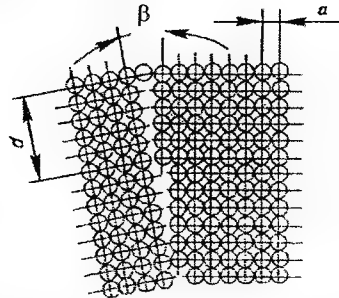


Рис. 3.7. Міжблокова межа, утворена крайовими дислокаціями:
 a – відстань між сусідніми блоками; d – відстань між дислокаціями;
 β – кут розорієнтування сусідніх блоків

Багато властивостей матеріалів більшою мірою залежить від характеру зв'язку між окремими кристалами, ніж від властивостей кристалів. Наприклад, велика різниця міцності крейди, вапняка і мрамру зумовлена саме різною структурою гірської породи. Більшість матеріалів складається не з одного, а із різних кристалів.

Фактична міцність твердих кристалічних матеріалів значно менша за теоретичну, яка визначається за величиною міжатомних зв'язків ідеальних кристалів. Відомо, що, визначаючи міцність великої кількості однакових за розмірами зразків, отримують різні

результати. Це породило уявлення про те, що міцність реальних матеріалів істотно залежить від дефектів, причому наявність дефектів кристалічної ґратки не може вплинути на таку велику різницю в значеннях теоретичної і фактичної міцності. За Гріффітсом, ці дефекти представлені мікротріщинами.

Мікротріщини у твердих матеріалах утворюються переважно внаслідок механічних пошкоджень, зокрема за різних способів видобутку мінеральної сировини. Роль дислокацій також суттєва – вони можуть скупчуватися біля перешкод, які заважають їх руху. Скупчення дислокацій спричинює значні локальні напруження, що призводить до об'єднання декількох дислокацій й утворення зародка мікротріщини.

Таким чином, в об'ємі твердого тіла утворюються мікро- і макродефекти, які інколи виходять на поверхню. Дефекти рухливі і здатні до анігіляції і коагуляції. Унаслідок деформації твердого тіла розміри і кількість дефектів збільшуються, за певної їх щільності у твердому тілі виникають тріщини, більші за критичну величину, і матеріал руйнується. Унаслідок стискання або зменшення навантаження тріщини в об'ємі зникають, але після повторного навантаження вони знову розширюються, тому через періодичні навантаження кількість дефектів зростає і міцність матеріалу зменшується (механічна втома).

Важливість впливу дефектів на міцність твердих матеріалів визначається масштабністю фактора, тобто залежністю середньої міцності зразків від їх розмірів. Пов'язано це з тим, що вірогідність виникнення тріщини, яка спричиняє руйнування, на меншому зразку менша, ніж на більшому.

Величина зменшення міцності твердого матеріалу значною мірою залежить від положення мікротріщини відносно напрямку дії руйнівного зусилля. В найпростішому випадку, коли дефект являє собою невелику мікротріщину, вплив на міцність пов'язаний з її розміром. По краях мікротріщини пружні напруження різко збільшуються, виникає перенапруга, тим більша, чим більший розмір тріщини відносно об'єму зразка. Руйнування починається в

момент, коли перенапрута сягне теоретичної міцності матеріалу. При цьому середнє напруження макроскопічної одиниці площі незначне, воно може бути меншим за теоретичну міцність приблизно в 100...1000 разів (за Франкелем).

Величина мінімального прикладеного зусилля $P_{\min}$, за якого напруження на краях мікротріщини з кривизною порядку міжатомної відстані сягає величини теоретичної міцності і руйнує, визначають за формулою Поляні:

$$P_{\min} = \sqrt{\frac{2\sigma E}{l}}, \quad (3.12)$$

де σ – поверхнева енергія твердого тіла; E – модуль пружності; l – довжина тріщини.

Отже, руйнівне зусилля для твердого матеріалу пропорційне поверхневій енергії, модулю пружності й обернено пропорційне довжині мікротріщини. Руйнування розглядають як неперервний процес, який відбувається в механічно напруженому стані із швидкістю, залежною від величини напруження тіла.

Подрібнення не можна розглядати тільки як суто механічний процес руйнування твердих тіл. Деякі фізико-хімічні процеси сприяють помелу матеріалів. З-поміж них особливе значення має процес адсорбції поверхнево активних речовин (ПАР), які зменшують твердість матеріалів. Крім того, в процесі помелу, особливо тонкого, інколи відбуваються так звані хіміко-механічні реакції. Для того щоб ці реакції відбувалися у звичайних умовах, потрібне підвищення температури.

Наприклад, під час помелу вапняку, доломіту, магнезиту та інших карбонатів в кульовому млині виділяється CO_2 в кількості $\sim 40\text{см}^3$ на 1 г породи. Кількість CO_2 зменшується в міру підвищення температури дисоціації матеріалів, тобто разом з підвищенням хімічної стійкості. Виділення CO_2 триває і після закінчення процесу помелу, але в меншій кількості. Залежно від складу продуктів хіміко-механічної реакції можуть виникати вторинні реакції.

Зокрема, під час помелу кальцита в присутності парів води утворюється гідроксид кальцію. Інтенсивний помел сприяє також фазовим перетворенням мінералів.

3.4. Кінетика помелу і розмельність матеріалів

Закономірності подрібнення можна використовувати тільки для якісної і порівняльної оцінки роботи подрібнювачів. Ще більші розбіжності виникають у визначенні енергії на тонкий і надтонкий помел матеріалів. З'ясовано, що за збільшення ступеня помелу матеріалу зростає й робота, потрібна для виконання процесу, або збільшується час досягнення належної дисперсності. Кінетичні закономірності тонкого і надтонкого помелу висвітлено в багатьох роботах.

Для різних видів подрібнювачів і матеріалів запропоновано ряд емпіричних залежностей, які пов'язують час помелу з дисперсністю матеріалів. Зокрема, Г. Ходаков запропонував визначити кінетичну залежність помелу кварцу за постійного режиму помелу:

$$k \cdot \tau = \ln \frac{S_m}{S_m - S_0}, \quad (3.19)$$

де k має зміст константи помелу кварцу і визначається за формулою

$$K = 3 \cdot 10^{-11} \frac{N \cdot \eta}{V L S_m}; \quad \tau - \text{час помелу, год; } N - \text{потужність, кВт;}$$

V – об'єм матеріалу, м^3 ; L – товщина аморфізованого шару на поверхні зерен матеріалу, м ; S_m – питома поверхня граничного подрібненого матеріалу із зернами розміром $X < X_m$, $\text{м}^2/\text{кг}$; X_m – граничний розмір зерен, які не подрібнюються в даному режимі, м ; S_0 – питома поверхня подрібненого матеріалу, $\text{м}^2/\text{кг}$; η – коефіцієнт корисної дії подрібнювача.

Цю закономірність виведено, зважаючи на вплив середовища, витрати енергії на руйнування, а також потужність подрібнювача і дисперсність матеріалу.

Виведено закономірність (В.Товаров, С.Андреев) кінетики зменшення вмісту крупної фракції в результаті помелу в кульовому млині періодичної дії:

$$R_{\tau} = R_0 e^{-k\tau}, \quad (3.20)$$

де R_{τ} – вміст крупної фракції через час τ після початку помелу, %; R_0 – вміст крупної фракції у вихідному матеріалі, %; τ – час помелу, год; k – параметр, який характеризує відносну швидкість помелу, тобто відношення кількості частинок крупної фракції, подрібнюваної за одиницю часу, до сумарної кількості частинок цієї фракції в млині в певний момент часу.

Після логарифмування закономірності (3.20) отримуємо:

$$\begin{aligned} \ln R_{\tau} &= \ln R_0 - k\tau, \\ \text{або} \quad k \cdot \tau &= \ln \left(\frac{R_0}{R_{\tau}} \right), \end{aligned} \quad (3.21)$$

де відношення R_0/R_{τ} характеризує ступінь помелу матеріалу.

Порівняння закономірності (3.20) із закономірністю (3.21) доводить їх подібність. Величина k має той самий зміст константи відносної швидкості помелу; вираз R_0/R_{τ} характеризує ступінь помелу вихідного матеріалу за час τ , а вираз $S_m/(S_m - S_0)$ – ступінь досягнення за час τ гранично можливого помелу. Обидві закономірності в міру помелу матеріалу наближаються до нескінченності. Числові значення k в обох закономірностях різні.

Закономірності кінетики помелу вказують на значне сповільнення його в часі, що підтверджується практикою помелу в промислових умовах. Як зазначають В.Товаров і С.Андреев, в реальних умовах помелу в промислових млинах спостерігається систематичне відхилення результатів від розрахункових, що зумовлює необхідність доповнити залежність кінетики помелу напівемпіричним параметром m і надати їй такого вигляду:

$$R_{\tau} = R_0 e^{-k\tau^m}. \quad (3.22)$$

Результати досліджень підтвердили, що формула (3.22) виражає закономірність зменшення крупної фракції в значному інтервалі тонкості помелу і за різних умов розмелювання.

Перетворимо рівняння (3.22) на таке:

$$\frac{R_0}{R_{\tau}} = e^{k\tau^m}. \quad (3.23)$$

Подальше подвійне логарифмування приведе його до вигляду

$$\ln \left(\ln \frac{R_0}{R_{\tau}} \right) = m \lg \tau + \lg(klge), \quad (3.24)$$

яке в координатах $\ln \tau$ і $\ln \left(\ln \frac{R_0}{R_{\tau}} \right)$ буде прямою лінією з кутовим коефіцієнтом m .

Коефіцієнт k можна визначити логарифмуванням вихідного кінетичного рівняння (3.22):

$$k = \frac{\ln \left(\frac{R_0}{R_{\tau}} \right)}{\tau^m}. \quad (3.25)$$

Таким чином, коефіцієнти m і k в рівнянні кінетики помелу взаємно пов'язані – за збільшення m зменшується k .

Фізичний зміст величини m характеризує зміну відносної швидкості помелу. Якщо відносна швидкість помелу не змінюється, то $m = 1$, якщо збільшується, то $m > 1$, а якщо зменшується, то $m < 1$.

Зміна відносної швидкості помелу зумовлена, по-перше, тим, що в міру зменшення розміру зерен ступінь їх мікроскопічної дефектності зменшується, що утруднює процес помелу, а по-друге, зменшення розміру частинок в процесі помелу приводить до збільшення швидкості помелу. Це можна пояснити тим, що в результаті наближення розміру частинок до граничного зменшується потрібна кількість ударів для домелювання. Тому величина параметра m може бути більшою і меншою від одиниці.

Отже, параметр m залежить від властивостей вихідного матеріалу і характеристики молотильних тіл у млині. Величина коефіцієнта k , який має зміст константи швидкості помелу, найчастіше визначає граничну крупність помелу і за більш тонкого помелу зменшується.

Рівняння (3.22) задовольняє більшість результатів досліджень у визначених проміжках часу і крупності продукту від 80...100 % до 5...10 % залишку крупної фракції. Але воно не задовольняє граничних умов, коли швидкість помелу $dR/d\tau$ в початковий період ($\tau \rightarrow 0$) за $m > 1$ наближається до нуля, а за $m < 1$ до нескінченності.

З'ясовано також, що константа швидкості помелу матеріалів k корелює з деякими їх фізичними властивостями. Більші значення k означають менші значення в'язкості, коефіцієнта термічного розширення, більші значення зсуву, в той же час немає взаємозалежності з мікротвердістю матеріалу.

Згадані взаємозалежності свідчать про те, що крихкіші матеріали мають більші константи швидкості помелу. Крихкість характеризується малими значеннями ударної в'язкості і меншими значеннями амплітуди теплових коливань внаслідок зменшення здатності матеріалу розсіювати пружну енергію деформації, яка концентрується біля мікродфектів структури. Пряма залежність коефіцієнта k від модуля зсуву пояснюється тим, що за його підвищення збільшується зусилля, потрібне для надання руху по площині спайності.

Як технічну характеристику кінетики помелу для практичних цілей запропоновано коефіцієнт розмельності M , який являє собою відношення питомої продуктивності млина за заданого матеріалу Q_m і матеріалу, взятого за еталон Q_e :

$$M = \frac{Q_m}{Q_e}. \quad (3.26)$$

Питому продуктивність млина визначають за формулою:

$$Q_m = \frac{M}{v\tau}, \quad (3.27)$$

де M – маса матеріалу; v – робочий об'єм млина; τ – тривалість помелу до контрольної крупності.

Коефіцієнт розмельності і питома продуктивність млина пов'язані лінійною залежністю:

$$Q_m = 41,46 M - 0,64 \text{ кг/квт} \cdot \text{год}. \quad (3.28)$$

Таким чином, за більшого коефіцієнта розмельності збільшується вихід помелу.

У промисловості будівельних матеріалів коефіцієнт розмельності визначають як відношення тривалості помелу матеріалу, взятого за еталон (цементний клінкер), і тривалості помелу вихідного матеріалу до 10 % залишку на ситі № 009. Значення коефіцієнта розмельності деяких матеріалів наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Коефіцієнт розмельності M деяких матеріалів

Матеріал	Значення коефіцієнта розмельності, M
Цементний клінкер	1
Опока	1,3...1,4
Пісок кварцовий	0,6...0,7
Вапняки	0,9...1,1
Глина суха	1,5...2,0
Магнезит	0,7...1,0
Тальк	1,04...2,1
Вапно	1,65
Вугілля	0,7...1,35

Аналіз значень коефіцієнта розмельності свідчить, що він залежить не тільки від властивостей матеріалів, а й від умов розмелювання і класифікації, дисперсності помелу і конструктивних особливостей подрібнювачів.

3.5. Загальні закономірності впливу зовнішнього середовища на кінетику помелу

Дослідження останніх років свідчать про те, що на механізм руйнування твердих матеріалів, на їх міцність і крихкість значний вплив мають деякі рідини, які хімічно або фізично сорбовані на поверхні матеріалу або на поверхні його внутрішніх порожнин. Величина цього ефекту залежить від міцності зв'язку сорбованих молекул з поверхнею, швидкості утворення і руйнування адсорбованих шарів і розтікання їх по поверхні.

Молекули твердих тіл на межі з вакуумом або з рідиною, на відміну від молекул в об'ємі, зазнають сил, рівнодійна яких спрямована всередину об'єму. Тому частинка речовини на поверхні розподілу фаз має деякі особливі властивості, відмінні від властивостей її в об'ємі. Цей ефект зумовлює чимало явищ, які дістали назву «поверхневих». Це такі явища, як каталіз, адсорбція, когезія, капілярність та інші. До них належить також і ефект поверхнево-активних речовин (ПАР), відкритий 1928 р. академіком П. Ребіндером.

Ефект Ребіндера і деякі інші поверхневі явища справляють значний вплив на процеси подрібнення. Адсорбція ПАР із зовнішнього середовища без будь-якої хімічної взаємодії може значно знижувати межу пружності, міцність і твердість, полегшувати руйнування крихких тіл і збільшувати пластичність. Під час деформації твердого тіла в його поверхневому шарі виникають і збільшуються клиноподібні мікротріщини, які зникають після усунення навантаження. Адсорбційні шари, мігруючи по поверхні, досягають устя мікротріщини і перешкоджають змиканню. Плівка рідини між твердими поверхнями виявляє розклинувальну дію, яка в вузьких щілинах помітно сприяє їх розширенню (рис. 3.8). Тиск є максимальним в кінці мікротріщини, до якого може проникнути ПАР. Товщина плівок рідини в мікротріщині становить від сотень до тисяч молекул і сягає 0,1 мкм. Розклинувальний тиск залежить від величини енергії змочування поверхні твердого тіла.

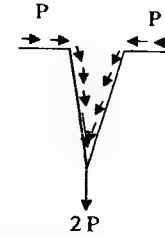


Рис. 3.8. Схема дії ПАР в мікротріщині

П. Ребіндером та його школою виявлено три різних ефекти впливу зовнішнього середовища. Залежної від умов дія середовища проявляється в ефекті пластифікації, або збільшенні крихкості, або самочинному руйнуванні. Визначальним фактором належності до одного із цих випадків є величина зниження поверхневої енергії твердого тіла. За незначного її зниження спостерігаємо ефект пластифікації, за зменшення до десяти раз – збільшення крихкості, а в разі зменшення поверхневої енергії в десятки разів – самочинне руйнування.

Вирішальним фактором прояву адсорбційного ефекту є наявність дефектів кристалічної ґратки. Зважаючи на те, що дефекти мають надмірну вільну поверхневу енергію, на них відбувається інтенсивна взаємодія молекул ПАР і твердого тіла. Крім того, по дефектах структури адсорбовані атоми з поверхні тіла надходять до місця зародження тріщини. Адсорбційні ефекти проявляються тим сильніше, чим більша дефектність, на бездефектних кристалах їх немає.

Молекули ПАР проникають в клиноподібні мікротріщини на поверхні тіла завдяки властивій їм здатності рухатися по адсорбованій поверхні. Внаслідок здатності до подібної двомірної міграції молекули ПАР покривають рівномірним (мономолекулярним) шаром доступну їм поверхню мікротріщини.

Проникнення ПАР зумовлене зниженням поверхневої енергії твердого тіла від початкового значення σ_0 до σ_r відповідно до поверхневої енергії тіла, покритого адсорбованим шаром зі

ступенем ущільнення Γ моль/см². Рушійна сила втягування адсорбованих шарів в мікротріщині становить:

$$P_{\sigma} = \sigma_0 - \sigma_r, \quad (3.29)$$

де σ_0 – поверхнева енергія вихідного матеріалу, Дж/м²; σ_r – поверхнева енергія матеріалу, поверхня якого покрита шаром ПАР щільністю Γ моль/см²; P_{σ} – рушійна сила втягування, МПа.

Цей двомірний тиск (див. рис. 3.8) являє собою силу, яка діє на одиницю довжини лінійної межі адсорбованого шару. Молекули ПАР переміщуються двома поверхнями в глибину мікротріщини до місця, де їх рух обмежується розміром адсорбованих молекул. Саме в цих місцях всередині мікротріщини утворюється межа, до кожної одиниці довжини якої прикладено двомірний тиск P_{σ} адсорбованого шару, спрямований у бік збільшення щільності в глибину твердого тіла.

Принципова відмінність між дією ПАР і рідиною полягає в тому, що ПАР проникає в мікрощілину в результаті двомірної міграції окремих поверхнево-активних молекул під впливом двомірного тиску вздовж обох поверхонь мікрощілини, тоді як проникнення рідини пов'язане з її здатністю змочувати поверхню тіла. Капілярний тиск, який характеризує всмоктувальну силу

$$P_k = \frac{2\sigma_{p\phi}}{r} \cdot \cos\phi, \quad (3.30)$$

обернений ширині мікрощілини. Оскільки мікрощілини можуть бути дуже малих розмірів, капілярний тиск може виявитися значним. Слід, однак, зауважити, що кінетика всмоктування залежить від в'язкості рідини, її описують рівнянням:

$$\frac{dl}{d\tau} = \frac{\tau^2 \rho}{8\eta} \left(\frac{P_k}{\rho l r} - g \sin\phi \right), \quad (3.31)$$

де P_k – капілярний тиск; r – ширина мікрощілини; l – довжина стовпчика рідини в капілярі; τ – тривалість всмоктування;

ρ – густина рідини; η – в'язкість рідини; ϕ – кут нахилу капіляра до горизонтальної площини; g – прискорення вільного падіння.

Аналіз рівняння (3.32) свідчить, що в'язкість рідини впливає на кінетику її всмоктування в мікротріщину. При цьому в мікротріщині виникає великий в'язкий опір, а швидкість всмоктування дуже мала, тому рідина практично не заповнює вузьких мікротріщин.

Ефективність розчинів ПАР в нейтральному середовищі залежить від їх концентрації. Оптимальна концентрація узгоджується з умовами утворення насиченого мономолекулярного шару на поверхні твердого тіла. Є припущення, що зменшення ефективності ПАР залежно від концентрації пов'язане з агрегацією молекул в розчині. Виявлено також, що адсорбційне середовище не залишається нейтральним, а суттєво впливає на процес сорбції і руйнування твердого тіла. Дослідження впливу ПАР на процеси подрібнення сприяли широкому використанню цього ефекту для подрібнення і помелу гірських порід, клінкеру, вугілля, графіту та інших матеріалів. З'ясовано також, що в разі використання сталевих молотильних тіл ефекту від введення ПАР немає. Отже, слід використовувати скляні, фарфорові, галькові молотильні тіла.

Зниження інтенсивності помелу за збільшення вологості дисперсних матеріалів можна пояснити, розглянувши властивості таких порошків. Як з'ясував Г. Ходаков (рис. 3.9), за мокрого помелу кварцу, вологість якого становить декілька відсотків, властива в'язкість і міцність. Частина вологого порошку прилипає до поверхні молотильних тіл, що також зменшує інтенсивність помелу. Такі властивості вологих матеріалів спричинені утворенням коагуляційної структури між частинками кварцового піску, з'єднаних тонкими прошарками води.

Середню товщину прошарків води між зернами твердого тіла, відповідну початку утворення коагуляційної структури, можна визначити за величиною питомої поверхні і вмістом води. Кількість

води, відповідну одному насиченому мономолекулярному шару, можна обчислити за величиною посадкової площі молекули води:

$$\sigma = \frac{M_{\text{BM}}}{F_{\text{BM}}} = \frac{18 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24}}{0,5 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2} = 0,26 \text{ мг/см}^2,$$

де M_{BM} – маса молекули води, г; F_{BM} – посадкова площа молекули води, см^2 ; σ – маса одного мономолекулярного шару води, мг/см^2 .

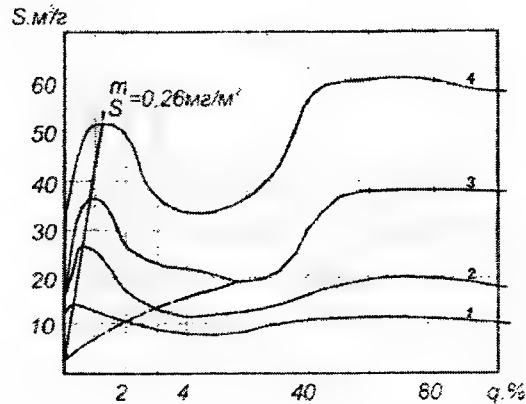


Рис 3.9. Вплив вмісту води на кінетику помелу кварцового піску:
криві 1, 2, 3, 4 – відповідно 2, 4, 8, 16 – хв помелу

Максимальна продуктивність млина відповідає утворенню на поверхні зерен одного насиченого мономолекулярного шару води.

Мінімальна ефективність помелу відповідає найбільшій міцності коагуляційної структури вологого матеріалу. Розрахунки свідчать, що такі умови помелу відповідні товщині оболонки води 5...10 насичених мономолекулярних шарів. За збільшення товщини прошарків води між зернами відбувається ослаблення коагуляційної структури, що сприяє інтенсивності помелу.

За вмісту води, коли товщина оболонки становить близько 40...1000 моношарів (0,01...0,02 мкм), починається ділянка мокрого

помелу і подальше збільшення вологості стає неефективним. Одночасно оболонки води такої товщини надійно запобігають агрегації частинок. Результати досліджень не суперечать теорії коагуляційного структуроутворення, згідно з якою міцність таких структур визначається ван-дер-ваальсівськими силами. Дія цих сил поширюється на декілька молекулярних радіусів.

Дослідження впливу ПАР на процеси помелу різних матеріалів підтверджують, що їх використання є ефективним для диспергування дуже твердих і крихких матеріалів (корунду, карборунду, кварцу, цементного клінкеру тощо). За меншої твердості матеріалів вплив ПАР на їх помел різко зменшується і збігається з убаванням твердості за шкалою Мооса.

Роль рідкого середовища у помелі твердих матеріалів полягає також в стабілізаційній дії.

3.6. Особливості властивостей тонкомелених порошків

У сучасних технологіях будівельних матеріалів широко використовують матеріали тонкого помелу. Їх застосування зумовлене тим, що за високої дисперсності твердої фази різко збільшується швидкість процесів в будь-яких системах: гетерогенних, одно- і багатокомпонентних. Пов'язане це не тільки із утворенням дедалі більшої реакційної поверхні, а й з підвищенням її питомої реакційної здатності.

Завдяки цьому одиниця поверхні твердої фази за тонкого помелу більш реакційноздатна, ніж за грубого подрібнення.

Таким чином, тонкодисперсним системам притаманна більша активність, ніж грубозернистим, що визначає їх специфічну поведінку в різнобічних реакціях під час виготовлення будівельних матеріалів і виробів.

У результаті помелу багатьох кристалічних матеріалів (кварцу, кальциту, корунду, кварцового скла тощо) на поверхні частинок утворюється аморфізований шар (шар Бейльбі) (рис 3.10).

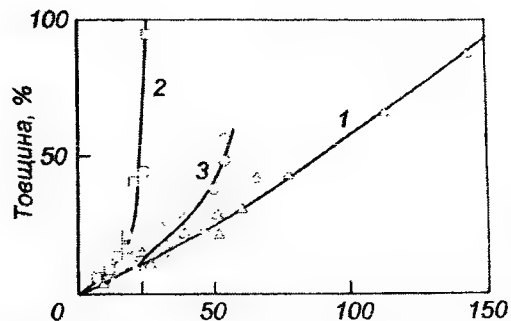


Рис. 3.10. Порівняння дисперсності й аморфізації кварцу:
1 – 80% води; 2 – сухе повітря; 3 – 1,2% води

Цей шар має властивості, які дуже відрізняються від властивостей в об'ємі матеріалу – він твердіший, більш розчинний, причому теплота розчинення більша; в ньому практично зруйнована вихідна кристалічна ґратка, атоми перегруповані і не мають чіткої структури, але мають більшу потенційну енергію.

Утворення і збільшення аморфізованого шару на частинках тонкого помелу залежить від фізико-механічних умов подрібнення. За мокрого помелу товщина цього шару збільшується повільніше, ніж за сухого, і досягає тієї ж самої товщини за більшої дисперсності. Розвиток аморфізованого шару зумовлений пластичними деформаціями поверхні частинок унаслідок їх руйнування.

Зниження аморфізації під впливом води пов'язане з зменшенням глибини шару граничних пластичних деформацій, тобто за наявності води матеріал стає крихкішим. За результатами багатьох досліджень, товщина аморфізованого шару становить 0.02..0.15 мкм.

3.7. Класифікація зернистих матеріалів

Розподілення твердих зернистих матеріалів на фракції за крупністю кусків або зерен називається класифікацією. Відомі два основні способи класифікації: 1 – ситовий (грохочення), механічне

розподілення на ситах; 2 – гідралічний: розподіл суміші на фракції зерен, які мають однакову швидкість осадження у воді.

Розподіл суміші зерен на фракції в повітряному середовищі називають *повітряною сепарацією*.

Видалення залізистих вкраплень із суміші зерен називають *магнітною сепарацією*.

Незалежно від методу розподілення метою класифікації матеріалів є, по-перше, відокремлення зерен певного розміру за багатостадійного подрібнення, а по-друге, подальше подрібнення тільки крупніших зерен. Основний продукт розподіляють на більш вузькі фракції для отримання зернових сумішей потрібної щільності.

Після розсіювання на кожному ситі утворюється два продукти – верхній і нижній. У результаті розсіву матеріалу крізь « m » сит кількість фракцій становить « $m + 1$ ».

Для видалення зерен більш як двох фракцій застосовують багатостадійне грохочення, яке може бути виконане одним з трьох способів (рис. 3.10):

- від дрібних до крупних – крізь послідовний ряд сит з різним розміром отворів – від менших до більших;
- від крупного до дрібних – крізь розміщені один на одному сита, розмір отворів яких зменшується;
- комбінований.

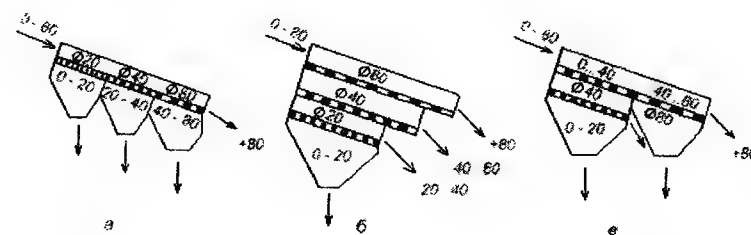


Рис. 3.11. Схеми класифікації твердих матеріалів:
а – від дрібних до крупних; б – від крупних до дрібних; в – комбінована

Перевагами грохочення за першою схемою є зручність заміни сит і нагляд за їх станом, розосереджене розвантаження фракцій по довжині сит. Недоліком цього методу є низька ефективність грохочення, через те що вся маса матеріалу завантажується на сито з найдрібнішими отворами, які перекриваються крупними фракціями, перевантаження і підвищена зношуваність дрібних сит та значне кришення крихкого матеріалу, а також утворення великих об'ємів пилу.

Перевагами грохочення за другою схемою є більш висока ефективність, менша зношуваність сит завдяки попередньому відсіву крупних фракцій, компактність установки.

Недоліком цієї схеми є труднощі з розвантаженням всіх фракцій біля одного кінця грохота, складність заміни сит і ремонту.

Недоліки перших двох схем грохочення частково усунуто в комбінованій схемі.

Для подрібнення гірських порід застосовують такі види грохочення: *попереднє*, за якого з вихідного матеріалу видаляється негабаритний матеріал або матеріал, який не потребує подрібнення; *контрольне*, яке застосовують для контролю подрібненого матеріалу: зерна, крупніші за визначений розмір, повертають на повторне дроблення; *остаточне* для розподілу подрібненого матеріалу на фракції.

Розподілення зерен матеріалу за фракціями характеризує зерновий склад вихідних матеріалів і продуктів збагачення.

Криві залежності, які відображають зерновий склад матеріалу, називають характеристиками крупності (рис. 3.12).

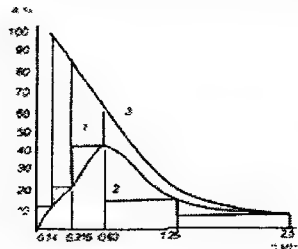


Рис. 3.12. Характеристики крупності матеріалів:
1 – гістограма за частковими залишками;
2 – крива розподілення за частковими залишками; 3 – кумулятивна крива

Розрізняють характеристики – *часткові, сумарні, криві розподілення*. *Часткова характеристика* відображає вихід окремих фракцій у відсотках і має вигляд гістограми – діаграми прямокутників. Якщо на осі абсцис відкладати розміри сит, а на осі ординат – залишки на цих ситах у відсотках, то отримаємо «криву просіювання».

Сумарні (кумулятивні) криві будують за частковими залишками, які підсумовують за наростанням підсумку. Будують часткові і сумарні криві розподілу за залишками на ситах, починаючи з найменшого розміру, тобто «за плюсом». Інколи застосовують побудову кривих за проходженням крізь сита, починаючи від найкрупніших, тобто «за мінусом».

Ряд формул відображають залежність між частковими і повними залишками і їх крупністю. Для дрібних фракцій продуктів подрібнення застосовують формулу Розіна – Раммлера:

$$\frac{100}{A} = e^{md^n}, \quad (3.33)$$

де A – повний залишок на ситі з розміром отворів d , %; m, n – коефіцієнти, які характеризують властивості подрібнених матеріалів.

Для дрібних фракцій подрібнення С. Андрєєв запропонував формулу:

$$(100 - A) = 100 \left(\frac{d}{d_{\max}} \right)^k, \quad (3.34)$$

де A – повний залишок на ситі з розміром d , %; $d_{\max}$ – максимальний розмір отвору сита, на якому залишок становить нуль; k – показник, який характеризує ступінь кривизни кумулятивної кривої, $K = 0,7 \dots 1,0$.

3.8. Методи визначення гранулометричного складу грубозернистих і дисперсних матеріалів

Крупність подрібнених твердих матеріалів оцінюють за кількісним складом окремих фракцій, тобто за гранулометричним складом. Його визначають за допомогою таких методів аналізу:

- *ситового* – розсіювання на ситах на фракції для матеріалів, крупніших за 0,04 мм;

- *ситового в комбінації* з повітряною сепарацією для матеріалів, крупніших за 0,005 мм;

- *седиментаційного* – розподілу матеріалу на фракції за швидкістю осадження твердих частинок в рідинах для матеріалів крупністю від 0,005 до 0,05 мм;

- *седиментаційного в комбінації з центрифугуванням* для розподілу частинок на фракції в межах від часток мікрона до 0,005 мм;

- *мікроскопічного* – шляхом вимірювання частинок під мікроскопом та їх класифікації за групами для матеріалів крупністю від часток мікрона до 0,05 мм;

- *абсорбційного* – шляхом визначення питомої поверхні дисперсних матеріалів.

Ситовий аналіз полягає в просіюванні проби матеріалу крізь набір сит і визначенні залишків на кожному ситі у відсотках відносно маси вихідної проби. Маса проби матеріалу залежно від крупності найбільшої фракції наведена в табл. 3.5.

Таблиця 3.5

Маса проби залежно від крупності фракції

Розмір найбільшої фракції, мм	0,1	0,3	0,5	1,0	3,0	5,0	10	20
Максимальна маса проби, кг	0,025	0,05	0,1	0,2	0,5	2	5	20

Сита (сітки) плетуть із сталюого, мідного, бронзового та інших видів дроту, кінського волосу, шовкових та інших ниток. Отвори сіток можуть бути квадратними або прямокутними. Площа живого перерізу сит становить близько 70%. Сита з прямокутними щілиноподібними отворами в 1,5...2,0 рази підвищують продуктивність грохотів. Недоліками дротяних сит є нерівна поверхня, що призводить до їх швидкого засмічення і зношування, і ймовірність розсування дротів.

Сітки для сит, які виготовляють із дроту або ниток, регламентовані стандартом. У вітчизняній практиці користуються стандартом сит, в якому розмір чарунок сітки відрізняється від наступного в 2 рази (шкала Тейлора).

Виготовлення тканих сіток з розмірами отворів, меншими за 40 мкм, є технічно складним.

Мікроскопічний аналіз полягає в підрахунку умовних розмірів і кількості частинок в заданому інтервалі розмірів або візуально, або за фотографіями мікроструктури препарату. Цей метод аналізу дає надійні і відтворювані результати тільки за ретельного вимірювання. Звичайний мікроскоп застосовують для визначення розмірів частинок, більших за 0,5 мкм, а електронний – в межах від 0,001 до 0,1 мкм.

Як один з непрямих методів визначення гранулометричного складу тонкомелених матеріалів застосовують седиментаційний метод аналізу, який ґрунтується на залежності швидкості осадження частинок у в'язкому середовищі від їх розмірів. Для визначення зернового складу порошків, утворених з дуже малих частинок (менших за 2...3 мкм), зважаючи на їх повільне осадження в полі сил тяжіння, застосовують центрифугування суспензій.

Гранулометричний склад матеріалу є найбільш повною характеристикою дисперсного порошку. Але в багатьох випадках достатньою, а інколи єдиною є величина питомої поверхні. Її визначають, застосовуючи метод повітропроникності спресованого шару матеріалу, і за ефектом низькотемпературної адсорбції азоту. Визначення питомої поверхні методом Козені – Кармана (метод КК) базується на ефекті фільтрації крізь спресований шар матеріалу за атмосферного тиску, а за методом Дерягіна – за значного розрідження (кнудсенівський режим).

Для визначення питомої поверхні за ефектом низькотемпературної адсорбції парів азоту вимірюють величину адсорбції газу за заданої температури і тиску. Питому поверхню

розраховують за залежністю полімолекулярної адсорбції Брунауера, Еммета і Телера (БЕТ).

Механічну класифікацію здійснюють за допомогою апаратів, обладнаних колосниками, решітками або ситами (рис. 3.13).

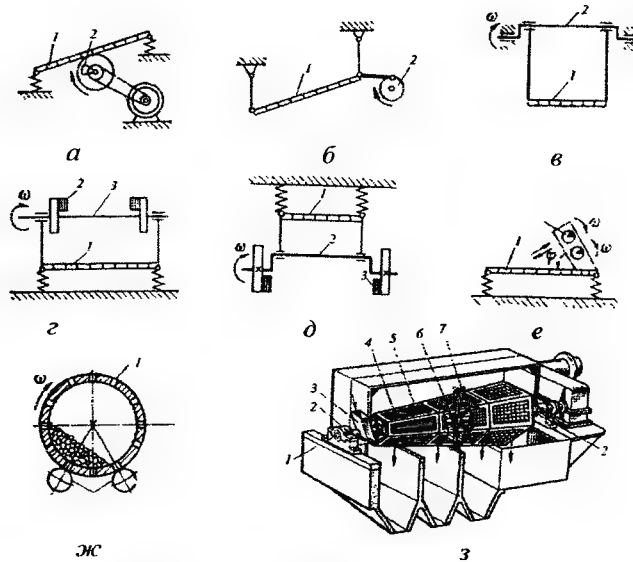


Рис. 3.13. Схеми механічних грохотів

У колосникових грохотах (а) просіювальна поверхня 1 здійснює колові коливання завдяки збуджувальній силі дебалансу 2.

У хитких грохотах (б) просіювальна поверхня 1 здійснює зворотно-поступальний рух від кривошипного механізму 2.

У віброгрохотах з гіраційним приводом (в) просіювальна поверхня 1 здійснює колові коливання завдяки обертанню ексцентрикового вала 3.

У віброгрохотах з інерційним приводом (г) просіювальна поверхня 1 коливається під дією відцентрової сили дебалансів 2, які встановлено на осі 3.

У самоцентрувальних грохотах з гіраційним приводом (д) просіювальна поверхня 1 здійснює колові коливання завдяки

обертанню ексцентрикового вала 2. Для зрівноваження на ньому встановлюють маховики з противагами 3.

У віброгрохотах з нахиленими коливаннями (е) просіювальна поверхня 1 здійснює прямолінійні нахилені коливання завдяки встановленню вібратора 2 з подвійними дебалансами, які обертаються назустріч один одному з однаковою швидкістю.

У барабанних грохотах (ж) просіювальна поверхня 1 обертається за допомогою приводних роликів. Переваги цих грохотів: повільне і рівномірне обертання без поштовхів і струшувань, що дає можливість встановлювати їх на верхній поверхні будівель і над бункерами.

Недоліки: низький к.к.д. (0,45...0,6) внаслідок використання малої частини поверхні сита; значні габаритні розміри, велика маса конструкції і складність виготовлення барабанних решіток.

Барабанні багатогранні грохоти (сита-бурати) (з) застосовують для класифікації сухих матеріалів з величиною частинок 1,3...3,5 мм і більше. На горизонтальному валу 1 грохота, встановленому в підшипники 2, закріплені втулки 6 з хрестовинами, які з кутиками утворюють каркас, до якого кріплять рамки 5 із ситами 4 різних розмірів. Матеріал надходить через воронку 3. Спочатку відсіюються найменші фракції, потім середні і, нарешті, найбільш крупні. Кожна фракція надходить до певного бункерного відсіку.

Крупність фракцій визначається розмірами просівів. Установка грохотів з деяким нахилом ще більше зменшує розмір зерен, які можуть просіятись крізь просіві решета або сита.

Практично частина зерен, розмір яких менший за розміри отворів сита, утримуються на ньому і залишаються в надситовому залишку.

Апарати для механічної класифікації за формою розміщення решіт або сит поділяють так:

- плоскі грохоти з горизонтальним або нахиленим розміщення сит;
- барабанні, в яких сито має циліндричну форму або форму зрізаної піраміди.

За характером руху виокремлюють такі:

- хиткі, які здійснюють 500...1000 коливань на хвилину;
- вібраційні, з кількістю коливань близько 3600 на хвилину;
- обертові, з кількістю обертів 15...20 на хвилину.

Плоскі грохоти застосовують для сортування матеріалів за грубого, середнього і тонкого подрібнення.

Найпростіші грохоти – нерухомі колосникові грохоти, решітки і сита. Колосникові решітки виготовляють із сталених штаб або балок, розміщених на деякій відстані одна від одної. Величина цієї відстані визначає граничний розмір зерен матеріалу, який просіюється крізь решітку.

Листові решітки виготовляють з круглими або щілиноподібними отворами. Найбільший розмір зерна d , який може просіятися крізь отвір нерухомого нахилоного сита, можна визначити за формулою:

$$d = D \cos \alpha - l \sin \alpha, \quad (3.35)$$

де D – розмір отворів сита; l – товщина дроту сита; α – кут нахилу сита.

Потужність плоского грохота залежить насамперед від швидкості руху зерен по поверхні сита. Збільшення її до деякої межі поліпшує якість грохочення, але, починаючи з якоїсь критичної швидкості, якість грохочення погіршується внаслідок того, що зерна проскакують крізь отвори сита (рис. 3.14).

Схема просіювання зерна, близького до сферичного, показана на рис. 3.15.

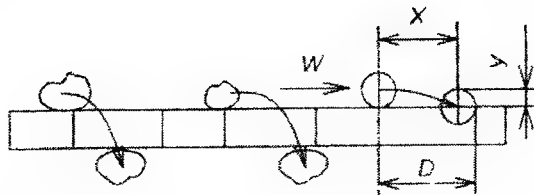


Рис. 3.14. Умова просіювання зерна крізь отвір грохота

Зерно рухається зі швидкістю W по полотну сита, отвори якого D значно більші за зерна d , і просіюється крізь отвір. Якщо

траєкторію руху центра тяжіння зерен під час просіювання крізь отвір вважати параболічною, то його вертикальне переміщення y за час τ можна визначити з рівняння:

$$y = \frac{g\tau^2}{2}.$$

За умови, що y дорівнює $0,5d$, час вільного падіння зерна крізь отвір сита становитиме:

$$\tau = \sqrt{\frac{2y}{g}} = \sqrt{\frac{d}{g}}.$$

Оскільки $x = D - 0,5d = w\tau$, то

$$W = \frac{D - d}{\tau} = \frac{D - 0,5d}{\sqrt{d/g}} = (D - 0,5d)\sqrt{g/d}.$$

Величина швидкості W є граничною, за більшої швидкості зерна проскакують повз отвори сита. Виявлено, що зерна просіюють крізь отвори сита за умови $d \leq 0,8D$ або $D \geq d/0,8$.

Тоді

$$W = \left(\frac{d}{0,8} - \frac{d}{2} \right) \sqrt{\frac{g}{d}} = 2,35\sqrt{gd}.$$

Вірогідність просіювання можна оцінити за залежністю:

$$P = \frac{(l-d)^2}{(l+a)^2} = l^2 \left(1 - \frac{d}{l} \right)^2 : (l+a)^2, \text{ вважатимемо } \lambda = \frac{l^2}{(l+a)^2}.$$

Ця величина характеризує відношення світлової поверхні отвору сита до його загальної поверхні (рис. 3.15). Для вузьких фракцій зерен з відносним розміром вважатимемо, що $x = d/l$.

Після підстановки отримаємо:

$$P = \lambda(1-x)^2. \quad (3.6)$$

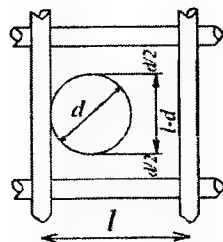


Рис. 3.15. Схема проходження зерна крізь отвір сита

Вірогідність просіювання зерен крізь отвори сита залежить від наявності таких умов: відношення розмірів зерен і отвору, траєкторії і швидкості руху зерна, форми зерна і отвору, вологості, наявності глинистих вкраплень, товщини полотна сита і величини його поперечного перерізу.

Кількість отворів, крізь які може проскочити зерно перед тим як просіятись крізь отвір сита, становить:

$$N = \frac{1}{P} = \frac{1}{\lambda(1-x^2)}. \quad (3.37)$$

Вірогідність проходження зерен крізь квадратний отвір, а також кількість потрібних для цього отворів наведено в табл. 3.7. Аналіз даних свідчить, що вірогідність різко зменшується, коли відношення d/D збільшується до 0,8, причому кількість отворів, потрібних для просіювання, значно збільшується.

Таблиця 3.7

Відношення, d/D	Вірогідність проходження зерна крізь отвір, P	Кількість потрібних отворів за $P = 1$, N
0,001	0,998	1
0,01	0,98	2
0,05	0,81	2
0,1	0,36	3
0,4	0,25	4
0,6	0,04	25
0,8	0,0025	400
0,95	0,0001	104
0,99	0,000001	106

Велику роль у грохоченні відіграє вологість матеріалу. Особливо утруднений розсів за високої вологості дрібнозернистих матеріалів. Причина в тому, що вологі дрібні частинки злипаються в грудочки. Під час класифікації таких матеріалів отвори сит затягуються тонкими плівками води, які перешкоджають проходженню зерен дрібної фракції.

Але у міру збільшення вологості матеріалу понад деяку межу рухливість зерен зростає і поступово утворюються сприятливі умови для мокрого грохочення; тому криві залежності ефективності грохочення від вологості матеріалу мають мінімуми. Продуктивність мокрого грохочення більша, ніж сухого, в декілька разів.

Процес механічної класифікації оцінюють за такими показниками: продуктивністю Q – кількістю матеріалу, який надходить на грохот за одиницю часу, й ефективністю грохочення E – відношенням маси матеріалу, який просіявся крізь сито, до маси матеріалу фракції, яка міститься у вихідному матеріалі:

$$E = \frac{[c - d(100 - c) \cdot 100]}{c}, \quad (3.38)$$

де E – ефективність грохочення; c – вміст зерен нижньої фракції у вихідному матеріалі (визначається розсівом лабораторної

проби), %; $d = \frac{(A - A^1)}{A^1}$ – відносний вміст зерен нижньої фракції

після грохочення в надрешітковому матеріалі; A – маса проби надрешіткового матеріалу; A^1 – маса тієї самої проби після відсіву з неї зерен нижньої фракції на лабораторному ситі з такими самими отворами, як і в грохоті.

Загальне рівняння кінетики грохочення, запропоноване В. Перовим, має вигляд:

$$E = 1 - e^{-k\tau^n}, \quad (3.39)$$

де E – ефективність грохочення в частках одиниці; τ – тривалість грохочення; k, n – параметри, які характеризують властивості матеріалу й умови грохочення.

Параметр n характеризує зміну відносної швидкості грохочення. В умовах процесу в міру збільшення завантаження грохота ефективність процесу поступово зменшується, а за деякий час змінюється дуже швидко. Це зумовлено тим, що внаслідок завантаження шар матеріалу на ситі збільшується, а за час перебування на ситі не відбувається розшарування матеріалу за крупністю. Надмірне зменшення завантаження також призводить до зменшення ефективності, через те, що матеріал в такому разі рухається стрибкоподібно і кількість зіткнень зерен з поверхнею сита є недостатньою для просіювання.

Запитання для самоперевірки

1. Яке значення мають процеси подрібнення в промисловості будівельних матеріалів?
2. У чому полягає теоретична і фактична міцність матеріалів?
3. Охарактеризуйте дефекти кристалічної ґратки, наведіть поняття про дислокації.
4. Який вплив справляють макро- і мікроефекти на процеси помелу матеріалів?
5. Охарактеризуйте фізичний зміст коефіцієнтів пропорційності в залежностях Реттінгера, Кирпичова – Кіка, Бонда.
6. Як визначити характерний середній розмір зерна і полізернистої суміші?
7. Як впливає вологість на кінетику помелу матеріалів?
8. Як впливає тонина помелу на активність клінкерних мінералів?
9. У чому полягає ефект «розклинювальної дії» ПАР на помел матеріалів?
10. У яких апаратах використовують крупне, дрібне і тонке подрібнення?

Розділ IV. ГІДРОМЕХАНІЧНІ ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ

4.1. Основні поняття прикладної гідростатики і гідромеханіки

Багато технологічних процесів у виробництві будівельних матеріалів пов'язане з перемішуванням, рухом газів і пароповітряної суміші, а також з розподілом неоднорідних сумішей шляхом осадження, фільтрування і центрифугування. *Швидкість цих процесів визначається законами гідродинаміки, тому вони називаються гідромеханічними.*

До рідин належать фізичні тіла, яким притаманні властивості текучості, вони не мають власної форми і набувають форми посудини, котру заповнюють. Законн гідромеханіки вивчають в гідравліці, яка складається із гідростатики і гідродинаміки. *Гідростатика вивчає закони рівноваги рідин і їх дію на обмежувальні стінки, а гідродинаміка – закони руху рідин і їх взаємодію з обмежувальними стінками.*

У гідродинаміці виокремлюють дві групи процесів, які становлять *внутрішню і зовнішню задачі. Внутрішня задача* розглядає рух рідин і газів в трубопроводах, апаратах, каналах, *а зовнішня – рух твердих частинок в газоподібному або рідкому середовищі. Процеси, пов'язані з рухом рідини крізь фільтрувальний шар, становлять змішану задачу гідродинаміки.*

Для полегшення виведення законів гідравліки використовують поняття *ідеальної рідини*, яка є абсолютно нестисливою, не має в'язкості і не змінює густини внаслідок зміни температури. Реальні (в'язкі) рідини поділяють на *краплинні і пружні.*

Краплинні рідини характеризуються нестисливістю, малим опором розтягання і дотичним зусиллям, незначним коефіцієнтом об'ємного розширення. *Пружні рідини* внаслідок зміни температури і тиску значно змінюють свій об'єм, не чинять опору розтягувальним і дотичним зусиллям, мають малу в'язкість.

Основними фізичними властивостями рідин є густина, питома вага, в'язкість, стискуваність і поверхневий натяг.

Густина – величина відношення одиниці маси рідини в стані спокою до її об'єму:

$$\rho = m / v, \quad (4.1)$$

де ρ – густина рідини, кг/м^3 ; m – маса рідини, кг ; v – об'єм рідини, м^3 .

Питома вага – величина відношення одиниці ваги рідини до її об'єму:

$$\gamma = G / V, \quad (4.2)$$

де γ – питома вага рідини, Н/м^3 ; G – вага рідини, Н ; V – об'єм рідини, м^3 .

Густина і питома вага рідини пов'язані між собою співвідношенням:

$$\gamma = \rho \cdot g,$$

де g – прискорення вільного падіння, $9,80665 \text{ м/с}^2$.

Питомий об'єм – це об'єм, який займає одиниця маси рідини:

$$v_{\pi} = V / M. \quad (4.3)$$

В'язкість – властивість рідини чинити опір переміщенню одних її шарів відносно інших (рис. 4.1) Уявімо переміщення рідини паралельними шарами. Виділимо із двох шарів, які рухаються на відстані dx , елементарні площадки F , причому нижній шар рухається із швидкістю W , а верхній – зі швидкістю $W + dW$.

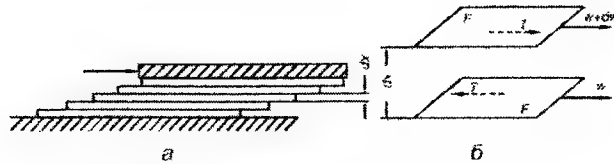


Рис. 4.1. Схема визначення в'язкості:

а – рух рідини в потоці; б – рух окремих елементарних шарів рідини

Величина dw/dx , яка називається градієнтом швидкості, може бути як додатною, так і від'ємною. Процес переміщення

одного шару рідини відносно іншого завжди розглядають в напрямку зменшення швидкості, тобто dw/dx вважають від'ємною величиною.

Сила внутрішнього тертя τ , яка при цьому виникає, залежить від в'язкості, градієнта швидкості і площі взаємодії:

$$\frac{d\tau}{dF} = -\nu \rho \cdot \frac{dw}{dx} \cdot dF, \quad (4.4)$$

де τ – сила внутрішнього тертя, Н/м^2 ; F – площа взаємодії, м^2 ; ν – кінематична в'язкість, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ – густина рідини, кг/м^3 ; dw/dx – градієнт швидкості, м/с ; $\nu \cdot \rho$ – добуток, який позначається μ і називається динамічною в'язкістю, Н·сек/м^2 .

Проінтегруємо рівняння (4.4), розділимо обидві частини на F і отримаємо:

$$\tau = -\mu \frac{dw}{dx}. \quad (4.5)$$

Рівняння (4.5) визначає закон внутрішнього тертя і має назву закону Ньютона, згідно з яким сила внутрішнього тертя між шарами рідини під час її руху прямо пропорційна градієнту швидкості. Знак мінус означає, що сила гальмує шар, який рухається з більшою швидкістю.

Рідини, які підлягають закону внутрішнього тертя, належать до нормальних, або ньютонівських, а всі решта – до аномальних, або неньютонівських.

В'язкість впливає на режими руху і зменшується в міру підвищення температури.

Важливою характеристикою рідин є пружність, що визначає їх стискуваність. Для оцінки цієї властивості використовують коефіцієнт об'ємної стискуваності:

$$\beta_{cm} = \frac{dv}{dP} \cdot V, \quad (4.6)$$

де β_{cm} – коефіцієнт об'ємного стискування, $1/\text{Па}$; v – початковий об'єм рідини, м^3 ; dv – відносна зміна об'єму, м^3 ; dP – тиск, Па .

Величину, обернену коефіцієнту об'ємного стиснення, називають модулем пружності:

$$E = 1/\beta_{cm}, \quad (4.7)$$

де E – модуль пружності, МПа.

Рідина виявляє тиск на поверхні посудини, в якій вона знаходиться. Розглянемо елементарну площадку dF всередині об'єму (рис. 4.2). На цю площадку діє сила dR , яку розкладемо на нормальну dP і дотичну $d\tau$. Сила dP діє по нормалі до поверхні площадки, тому сила $d\tau$ дорівнює нулю. Відношення $\Delta P/\Delta F$ відображає середній гідростатичний тиск, а межу цього відношення за $dF \rightarrow 0$ називають *гідростатичним тиском в точці*, або тиском, і визначають за формулою:

$$\lim \left(\frac{\Delta P}{\Delta F} \right)_{\Delta F \rightarrow 0} = P. \quad (4.8)$$

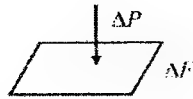


Рис. 4.2. Схема визначення тиску рідини

Величина гідростатичного тиску в будь-якій точці в напрямку осей X і Y по вісі Z є постійною; зміна положення точки вздовж вісі Z змінює тиск. Гідростатичний тиск в рідині, яка перебуває в стані спокою, можна представити у вигляді функції координат $P = f(X, Y, Z)$.

Поверхневий натяг. У деяких технологічних процесах рідини під час руху стикаються з газом або з іншою рідиною. Поверхня розділу між фазами наближається до мінімуму під дією поверхневих сил. Краплі рідини, завислі в газі або в іншій рідині, набувають кулеподібної форми. Це можна пояснити тим, що на молекули рідини на поверхні розділу фаз діє тиск, направлений по

нормалі до її поверхні, який прагне зменшити цю поверхню до мінімуму.

Отже, для створення нової поверхні потрібні витрати енергії (роботи), яку називають міжфазовим, або поверхневим, натягом:

$$\sigma = A/F, \quad (4.11)$$

де σ – поверхневий натяг, Н/м; A – робота, Дж; F – площа, м².

Поверхневий натяг зменшується в міру підвищення температури. Величина поверхневого натягу і поверхневої енергії пов'язані залежністю

$$\sigma = A + F \cdot dA/dF, \quad (4.12)$$

де σ – поверхневий натяг, Н/м; A – поверхнева енергія, Дж/м²; F – площа поверхні, м².

Поверхневий натяг впливає на змочуваність твердих матеріалів, а також на гідромеханічні умови проведення процесів в апаратах.

4.2. Основне рівняння гідростатики

У гідростатиці визначають закони рівноваги рідин, які перебувають у стані відносного спокою, тобто частинки рідини не переміщуються відносно одна одної.

Уявімо в деякому об'ємі рідини, яка перебуває в стані відносного спокою, елементарний паралепіпед об'ємом dv з ребрами розміром dx , dy і dz (рис. 4.3).

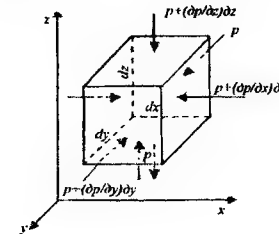


Рис. 4.3. До виведення диференціального рівняння рівноваги Ейлера

Складемо рівняння рівноваги цього паралелепіпеда у вигляді рівняння проекцій сил на координатні осі. Відповідно до основного принципу статки сума проекцій сил, що діють на елементарний об'єм, який перебуває в рівновазі, дорівнює нулю. Розглянемо суму проекцій сил на вісь Z . На цю вісь проектується сили тяжіння зі знаком $-gdm$, (причому $gdm = -g\rho dV = -\rho g dx dy dz$) і сили гідростатичного тиску. Ця сила діє по нормалі на нижню грань, її проекція на вісь Z $-\rho dx dy$. Зміна тиску в напрямку вісі Z дорівнює $\partial p / \partial z$, а по всій довжині ∂z становитиме $\left(\partial p / \partial z\right) \partial z$.

Гідростатичний тиск на верхню грань об'єму становитиме $\left[P + \left(\partial p / \partial z\right) \partial z\right]$, проекція сили гідростатичного тиску на вісь Z дорівнюватиме:

$$-\left[P + \left(\partial p / \partial z\right) \partial z\right] dx dy = 0.$$

Сума проекцій усіх сил на вісь Z становить $-\rho g dx dy dz + P dx dy - \left[P + \left(\partial p / \partial z\right) \partial z\right] dx dy = 0$.

Розкриємо дужки і виконаємо скорочення з огляду на те, що $dx dy dz = V$, отримаємо:

$$-\left(\partial p / \partial z\right) \partial z - \rho g = 0. \quad (4.13)$$

Аналогічно для X і Y отримаємо

$$-\partial p / \partial x = 0; \quad \partial p / \partial y = 0.$$

Таким чином, умова рівноваги елементарного об'єму виражається системою рівнянь

$$\left. \begin{aligned} -\partial p / \partial x &= 0; \\ -\partial p / \partial y &= 0; \\ -\rho g - \partial p / \partial z &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (4.14)$$

Система рівнянь (4.14) дає можливість визначити тиск у рідині в стані спокою, який змінюється по висоті. Зважаючи на те, що похідні $\partial p / \partial x$ і $\partial p / \partial y$ дорівнюють нулю, то частинну похідну $\partial p / \partial z$ можна замінити на dp / dz і тоді отримаємо:

$$-\rho g - dp / dz = 0. \quad (4.15)$$

Розділимо обидві частини рівняння (4.15) на ρg , поміняємо знаки і отримаємо рівняння у вигляді:

$$dz + dp / \rho g = 0. \quad (4.16)$$

Для нестисливої рідини густина є постійною величиною, отже:

$$dz + d\left(\frac{P}{\rho g}\right) = 0, \quad \text{або} \quad d\left(z + \frac{P}{\rho g}\right) = 0,$$

після інтегрування отримаємо:

$$z + \frac{P}{\rho g} = \text{const}. \quad (4.17)$$

Для двох довільно вибраних площин рівняння (4.17) можна записати у вигляді (рис. 4.4):

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g}.$$

Рівняння (4.17) є основним рівнянням гідростатики, його можна записати у вигляді:

$$P_1 = P_2 + \rho g (z_1 - z_2). \quad (4.18)$$

Рівняння (4.18) являє собою закон Паскаля, згідно з яким тиск в будь-якій точці рідини, що не стискується, передається однаково всім точкам її об'єму.

Гідростатичний тиск на стінки посудини, згідно із законом Паскаля, дорівнює:

$$P_2 = P_1 + \rho g H. \quad (4.19)$$

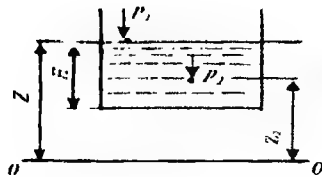


Рис. 4.4. Схема до виведення основного рівняння гідростатики

На основному законі гідростатики основана робота багатьох гідравлічних механізмів. Значення z_1 і z_2 – висота розміщення двох точок над довільно вибраною горизонтальною площиною відліку, а P_1 і P_2 – гідростатичний тиск у цих точках.

Величина Z в гідростатиці називається нівелірною висотою, а величина $\frac{P}{\rho g}$ – напором тиску, або п'єзометричним напором.

Згідно з основним законом гідростатики для кожної точки рідини в стані спокою сума нівелірної висоти і п'єзометричного напору є постійною величиною.

Члени основного рівняння гідростатики мають певний енергетичний зміст. Зокрема, вираз $\frac{P}{\rho g}$ характеризує питому енергію, тобто енергію, яка припадає на одиницю ваги рідини. Аналогічний зміст має і нівелірна висота.

Нівелірна висота Z називається також висотним (геометричним) напором, який характеризує питому потенціальну енергію положення певної точки над площиною порівняння, а п'єзометричний напор – питому потенціальну енергію тиску в цій точці. Суму енергій називають повним гідростатичним, або статичним, напором, який дорівнює загальній потенціальній енергії, що припадає на одиницю ваги рідини.

Отже, основне рівняння гідростатики являє собою окремий випадок закону збереження енергії: питома потенціальна енергія в усіх точках рідини в стані спокою є величиною постійною.

Для посудин різної форми (рис. 4.5), які заповнені рідиною до одного й того ж рівня h і мають однакову площу дна F , тиск на дно не є однаковим. Цю властивість рідини називають гідравлічним

парадоксом. Суть його полягає в тому, що маса рідини в посудині, відрізняється від сили тиску на дно. Всі величини у формулі $P = \rho gh$ для всіх посудин однакові, отже, повинні бути однаковими і сили тиску на дно посудини, тоді як маса рідини G_1 більша за G_2 , а G_2 більше за G_3 . Цей парадокс можна пояснити таким чином.

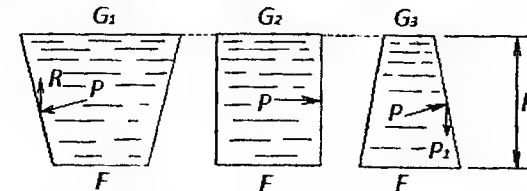


Рис. 4.5. Схема дії тиску в посудинах різної форми

Гідростатичний тиск завжди діє по нормалі на стінку посудини, і сила тиску на нахилені стінки має вертикальну складову P_1 , яка компенсує надмірну масу рідини в першій посудині і недостатню масу в третій. В циліндричній посудині сила P горизонтальна і не має вертикальної складової. Отже, в циліндричній посудині тиск дорівнює масі рідини.

Звідси випливає, що ємність для зберігання рідин, сипких матеріалів (бункери) доцільно виготовляти звуженими в зв'язку з тим, що тиск на стінки буде меншим.

Для вирішення багатьох практичних задач гідростатики має значення закон Архімеда, згідно з яким на тіло, занурене в рідину, діють дві сили – сила тяжіння G (вага тіла) і піднімальна (Архімедова) сила Q (рис. 4.6).



Рис. 4.6. Схема сил, які діють на частинку, занурену в рідину

При цьому можуть бути такі випадки:

– густина рідини і тіла однакові ($\rho_m = \rho_p$), тоді $G = \rho_m g w$ і $Q = \rho_p g w$. Оскільки рівнодійна сил $G = Q$ дорівнює нулю, тіло перебуває в стані рівноваги;

– густина тіла більша за густину рідини ($\rho_m > \rho_p$). В цьому випадку вага тіла більша за піднімальну силу. $G > Q$, їх рівнодійна направлена вниз, і тіло тоне;

– густина тіла менша за густину рідини ($\rho_m < \rho_p$), відповідно вага тіла менша за піднімальну силу $G < Q$, їх рівнодійна направлена вгору. Занурене в рідину тіло впливатиме доти, доки внаслідок виходу частини тіла над поверхнею рідини піднімальна сила не зменшиться до ваги тіла. Після цього тіло буде плавати на поверхні рідини.

Описані закономірності широко застосовують у техніці у випадках руху двофазних потоків (рідина – тверде тіло, газ – тверде тіло), в процесах осадження, псевдорозріднення, пневмо- і гідротранспортування.

4.3. Гідродинаміка. Основні положення

Рушійною силою руху рідин є різниця тисків, яка утворюється за допомогою насосів, компресорів, унаслідок різниці рівнів або густини рідин.

Для гідродинамічних процесів особливо важливе значення мають закони збереження маси, енергії і кількості руху. Всі явища, пов'язані з рухом рідини, описують системою диференціальних рівнянь, зокрема рівнянь руху і нерозривності потоку.

Параметри, що характеризують потік рідини, – витрати і швидкість. *Витратами потоку є кількість рідини, що протікає через поперечний переріз потоку за одиницю часу.* Розрізняють *об'ємні витрати*, що вимірюється в м³/с або м³/год, і *масові* вимірювані, в кг/с, кг/год, т/год.

У різних точках перерізу швидкість потоку неоднакова: в центрі труби вона максимальна, а біля стінок менша. Тому в розрахунках використовують не істинну швидкість, а фіктивну середню швидкість. Цю швидкість W визначають відношенням об'ємних витрат Q до площі перерізу S потоку:

$$W = Q/S, \quad (4.20)$$

де W – середня швидкість потоку, м/с; Q – об'ємні витрати, м³/с; S – площа перерізу, м², звідки об'ємні витрати становлять:

$$Q = WS, \quad (4.20a)$$

масові витрати визначаються добутком:

$$M = \rho WS, \quad (4.20b)$$

де M – масові витрати, кг/с; ρ – густина рідини, кг/м³.

Величина ρW являє собою масову швидкість рідини:

$$W_m = \rho W, \quad (4.20v)$$

де W_m – масова швидкість рідини, кг/м²·с.

Для характеристики форми і розмірів поперечного перерізу потоку використовують поняття живого перерізу і його складових – *змочуваний периметр і гідралічний радіус.*

Живим перерізом називають частину поперечного перерізу (труби, каналу), заповненого рідиною. Змочений периметр Π – це та частина периметра живого перерізу, з яким стикається рідина. Якщо поперечний переріз не циліндричної форми, то лінійним розміром вважають *гідралічний радіус r_e й еквівалентний діаметр d_e .* *Гідралічним радіусом називають відношення живого перерізу S до змоченого периметру Π :*

$$r_e = S/\Pi \text{ (м)}. \quad (4.21)$$

$$\text{Для труби } r_e = S/\Pi = \pi d^2 / 4\pi d = d/4.$$

Діаметр труби, який визначають через гідралічний радіус, являє собою еквівалентний діаметр:

$$d = 4r_e = \frac{4S}{\Pi} = d_e. \quad (4.22)$$

Для квадратного перерізу із стороною a :

$$d_e = 4a^2 / 4a = a. \quad (4.23)$$

Для прямокутного перерізу з сторонами a і b :

$$d_e = \frac{4ab}{2(a+b)} = \frac{2ab}{(a+b)}. \quad (4.24)$$

Для кільцевого перерізу, в якому рідина обмежена внутрішньою $d_{вн}$ і зовнішньою d_3 стінками, еквівалентний діаметр становить:

$$d_e = \frac{4S}{\Pi} = \frac{4\left(\frac{\pi d_3^2}{4} - \frac{\pi d_{вн}^2}{4}\right)}{\pi d_3 + \pi d_e} = \frac{d_3^2 - d_{вн}^2}{d_3 + d_e} = d_3 - d_{вн}. \quad (4.25)$$

4.4. Рівняння нерозривності потоку і витрати рідини

Розглянемо усталений рух рідини в трубі з різними поперечними розмірами (рис. 4.7). Для цього виберемо перерізи (I-I, II-II і III-III) і ділянку потоку між ними. За одиницю часу через переріз I-I проходить об'єм рідини $Q_1 = W_1 F_1$, через II-II – об'єм $Q_2 = W_2 F_2$, а через III-III – $Q_3 = W_3 F_3$. За умови нестискуваності рідини $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = const$ в ній не повинні утворюватися розриви і пустоти, тобто будуть дотримані умови суцільності і нерозривності.

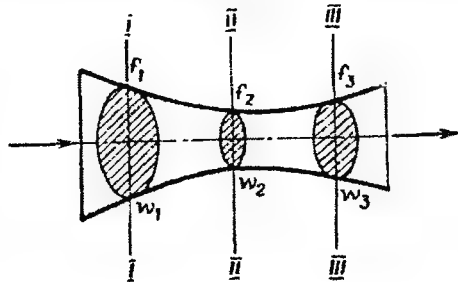


Рис. 4.7. Схема до виведення рівняння нерозривності потоку

За усталеного руху в трубі через кожний поперечний переріз F за одиницю часу проходить однакова кількість рідини:

$$F_1 W_1 = F_2 W_2 = F_3 W_3 = Q, \quad (4.26)$$

умова суцільності має вираз:

$$WF = const. \quad (4.27)$$

Для стисливих рідин $F_1 W_1 \rho_1 = F_2 W_2 \rho_2 = F_3 W_3 \rho_3$ умова суцільності має вигляд:

$$FW\rho = const. \quad (4.28)$$

Із рівняння (4.26) випливає, що $W_1/W_2 = F_2/F_1$, тобто швидкість рідини в поперечних перерізах за нерозривності потоку обернено пропорційна площі цих перерізів.

Рівняння нерозривності потоку, котре називають також рівнянням постійності витрат, є окремим випадком закону збереження маси, який визначає матеріальний баланс потоку рідини.

4.5. Диференціальне рівняння руху Ейлера

Як й у випадку виведення диференціальних рівнянь рівноваги Ейлера, виділимо в потоці рідини елементарний об'єм $dV = dxdydz$, орієнтований відносно осей координат (рис. 4.3).

Проекції сил тяжіння і тиску, які діють на об'єм рідини, становлять:

$$\begin{aligned} \text{для осі } X & \quad -\frac{\partial P}{\partial x} dxdydz; \\ \text{для осі } Y & \quad -\frac{\partial P}{\partial y} dxdydz; \\ \text{для осі } Z & \quad -\left(\rho g + \frac{\partial P}{\partial z}\right) dxdydz. \end{aligned} \quad (4.29)$$

Відповідно до основного принципу динаміки сума проекцій сил, що діють на елементарний об'єм рідини, яка рухається, дорівнює добутку маси рідини на її прискорення.

Маса рідини становить $dm = \rho dx dy dz$.

Якщо об'єм рідини рухається зі швидкістю w , а її прискорення становить $\frac{dw}{d\tau}$, то їх проекція на координатні осі дорівнює: $\frac{dw_x}{d\tau}$, $\frac{dw_y}{d\tau}$ і $\frac{dw_z}{d\tau}$, де w_x , w_y і w_z – складові швидкості вздовж осей X , Y і Z . Зміни $\frac{\partial w_x}{\partial \tau}$, $\frac{\partial w_y}{\partial \tau}$ і $\frac{\partial w_z}{\partial \tau}$ в усталеному потоці дорівнюють нулю.

Згідно з основним принципом динаміки:

$$\begin{aligned} \rho dx dy dz \frac{dw_x}{d\tau} &= -\frac{\partial P}{\partial x} dx dy dz; \\ \rho dx dy dz \frac{dw_y}{d\tau} &= -\frac{\partial P}{\partial y} dx dy dz; \\ \rho dx dy dz \frac{dw_z}{d\tau} &= \left(-\rho g - \frac{\partial P}{\partial z} \right) dx dy dz, \end{aligned} \quad (4.30)$$

або після скорочення:

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{dw_x}{d\tau} &= -\frac{\partial P}{\partial x} \\ \rho \frac{dw_y}{d\tau} &= -\frac{\partial P}{\partial y} \\ \rho \frac{dw_z}{d\tau} &= -\rho g - \frac{\partial P}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (4.31)$$

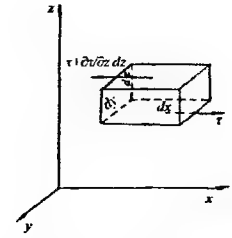
отримуємо систему диференціальних рівнянь Ейлера руху для сталого потоку (4.31).

Інтегралом системи рівнянь Ейлера є рівняння Бернуллі.

4.6. Диференціальне рівняння руху рідини Нав'є – Стокса

Під час руху реальної рідини в потоці, крім сил тяжіння і тиску, діють сили тертя. Дія цих сил проявляється у виникненні дотичних напружень на поверхні елементарного об'єму (рис. 4.8). Розглянемо випадок руху реальної (краплинної) рідини вздовж осі X .

Рис. 4.8. Схема до виведення рівняння Нав'є – Стокса



Проекція рівнодійної сил тертя на вісь X становить $\tau dx dy - \left(\tau + \frac{\partial \tau}{\partial z} dz \right) dx dy = -\frac{\partial \tau}{\partial z} dx dy dz$. Підставимо в цей вираз

значення $\tau = -\mu \frac{\partial w_x}{\partial z}$, отримаємо $\mu \frac{\partial \left(\frac{\partial w_x}{\partial z} \right)}{\partial z} dx dy dz = \mu \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} dx dy dz$.

У загальному випадку проекція сил тертя на вісь X матиме вигляд:

$$\mu \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} \right) dx dy dz.$$

Вираз в дужках є оператором Лапласа, який позначається ∇ . Відповідно проекцію рівнодійної сили тертя можна записати так:

на вісь X $-\mu \nabla^2 w_x dx dy dz$;

на вісь Y $-\mu \nabla^2 w_y dx dy dz$;

на вісь Z $-\mu \nabla^2 w_z dx dy dz$.

Проекції рівнодійної сили, яка діє на елементарний об'єм, з урахуванням системи рівнянь Ейлера становлять

на вісь X $\left(-\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \nabla^2 w_x \right) dx dy dz$;

на вісь Y $\left(-\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \nabla^2 w_y \right) dx dy dz$;

на вісь Z $\left(-\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \nabla^2 w_z \right) dx dy dz$.

Сума проєкцій сил на координатні осі повинна становити $\rho dx dy dz$. Прирівняємо проєкцію рівнодійної сили добутком маси на проєкцію прискорення і після скорочення на $dx dy dz$ отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{dw_x}{d\tau} &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \nabla^2 w_x \\ \rho \frac{dw_y}{d\tau} &= -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \nabla^2 w_y \\ \rho \frac{dw_z}{d\tau} &= -\rho g - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \nabla^2 w_z \end{aligned} \right\}. \quad (4.32)$$

Рівняння (4.32) являють собою систему рівнянь Нав'є – Стокса для руху реальної рідини.

4.7. Рівняння Бернуллі

Перемножимо обидві частини кожного із рівнянь Ейлера відповідно на dx , dy , dz і розділимо на густину ρ рідини, отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{dx}{d\tau} dw_x &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} dx; \\ \frac{dy}{d\tau} dw_y &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} dy; \\ \frac{dz}{d\tau} dw_z &= -gdz - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} dz. \end{aligned} \quad (4.33)$$

Після складення цих рівнянь похідні $\frac{dx}{d\tau}$, $\frac{dy}{d\tau}$ і $\frac{dz}{d\tau}$ є проєкціями w_x , w_y , w_z швидкості на відповідні осі, тобто:

$$w_x dw_x + w_y dw_y + w_z dw_z = -gdz - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial x} dx + \frac{\partial P}{\partial y} dy + \frac{\partial P}{\partial z} dz \right). \quad (4.34)$$

Кожну складову лівої частини рівняння можна записати як

$$w_x dw_x = d\left(\frac{w_x^2}{2}\right); \quad w_y dw_y = d\left(\frac{w_y^2}{2}\right) \quad \text{і} \quad w_z dw_z = d\left(\frac{w_z^2}{2}\right).$$

Відповідно їх сума становить:

$$d\left(\frac{w_x^2}{2}\right) + d\left(\frac{w_y^2}{2}\right) + d\left(\frac{w_z^2}{2}\right) = d\left(\frac{w_x^2 + w_y^2 + w_z^2}{2}\right) = d\left(\frac{w^2}{2}\right), \quad (4.34)$$

де w – швидкість, проєкції якої на координатні осі становлять w_x , w_y і w_z .

Сума членів в дужках правої частини рівняння (4.34) являє собою повний диференціал тиску dP . Отже:

$$d\left(\frac{w^2}{2}\right) = -\frac{\partial P}{\rho} - gdz.$$

Розділимо обидві частини рівняння на g і перенесемо всі члени в ліву частину:

$$d\left(\frac{w^2}{2g}\right) + \frac{\partial P}{\rho g} + gdz = 0. \quad (4.35)$$

Суму диференціалів замінюємо на диференціал суми

$$d\left(z + \frac{P}{\rho g} + \frac{w^2}{2g}\right) = 0.$$

Після інтегрування отримаємо

$$z + \frac{P}{\rho g} + \frac{w^2}{2g} = \text{const}. \quad (4.36)$$

Рівняння для будь-яких двох поперечних перерізів I-I і II-II потоку можна представити у вигляді

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{w_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{w_2^2}{2g}. \quad (4.37)$$

Рівняння (4.37) називається рівнянням Бернуллі для нестискуваної рідини. Вираз $\left(z + \frac{P}{\rho g} + \frac{w^2}{2g}\right)$ є повним гідродинамічним напором, який має три складники, з яких перші два z і $\frac{P}{\rho g}$ входять в основне рівняння гідростатики (4.17), а

величина $\frac{w^2}{2g}$ називається швидкісним напором і характеризує питому кінетичну енергію в певній точці перерізу.

Для руху реальної рідини рівняння Бернуллі треба доповнити величиною енергії, яка витрачається на подолання сил опору:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{w_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{w_2^2}{2g} + h_{\text{втр}}. \quad (4.38)$$

Якщо обидві частини рівняння (4.38) помножимо на ρg , отримаємо:

$$\rho g z_1 + P_1 + \frac{\rho w_1^2}{2} = \rho g z_2 + P_2 + \frac{\rho w_2^2}{2} + \Delta P_{\text{втр}}, \quad (4.39)$$

де $\Delta P_{\text{втр}} = \rho g h_{\text{втр}}$ – втрачений тиск.

4.8. Гідродинамічна подібність. Основні критерії

Рівняння Нав'є – Стокса разом з рівнянням нерозривності потоку являє собою систему диференціальних рівнянь, яка дає змогу описати рух реальної рідини. Але ця система рівнянь нерозв'язна, на практиці вона вирішується за допомогою методів теорії подібності або методу аналізу розмірностей.

Використовуючи теорію подібності, перетворимо диференціальне рівняння Нав'є – Стокса в критеріальне. Для цього перепишемо рівняння для осі Z в розгорнутому вигляді для неусталеного руху рідини:

$$\rho \left(\frac{\partial w_z}{\partial t} + w_x \frac{\partial w_z}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_z}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) = -\rho g - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right). \quad (4.40)$$

Для спрощення цього рівняння відкинемо знаки математичних операторів, замінимо диференціали величин самими величинами і отримаємо:

$$\rho \frac{w^2}{l} = -\rho g - \frac{P}{l} + \frac{\mu w}{l^2}. \quad (4.41)$$

Для отримання критеріїв подібності розділимо послідовно кожен член правої частини на ліву:

$$-\rho g \text{ на } \rho \frac{w^2}{l}, \text{ отримаємо, } \frac{gl}{w^2} - \text{критерій Фруда:}$$

$$\frac{gl}{w^2} \equiv F_r.$$

У розрахунках на практиці користуються оберненою величиною

$$F_r \equiv w^2 / gl. \quad (4.42)$$

Критерій Фруда характеризує вплив сил тяжіння, або власної ваги, на рух рідини.

$$-\frac{P}{l} \text{ на } \rho w^2 / l, \text{ отримаємо } \frac{P}{\rho w^2} - \text{критерій Ейлера:}$$

$$Eu \equiv \frac{P}{\rho w^2}. \quad (4.43)$$

Звичайно замість значення абсолютного тиску послуговуються різницею тисків ΔP між двома точками системи:

$$Eu \equiv \Delta P / \rho w^2.$$

Критерій Ейлера характеризує вплив перепаду гідростатичного тиску на рух рідини.

$$-\rho w^2 / l \text{ на } \mu w / l^2, \text{ отримаємо } \rho w l / \mu - \text{критерій Рейнольдса:}$$

$$Re \equiv \rho w l / \mu. \quad (4.44)$$

Критерій Рейнольдса характеризує вплив сил тертя на рух рідини.

$$-\rho w^2 / l \text{ на } \rho w / \tau, \text{ отримаємо } w \tau / l - \text{критерій гомохроності:}$$

$$H_0 \equiv w \tau / l. \quad (4.45)$$

У критерії гомохроності відображено неусталений характер руху рідини в подібних системах.

Розв'язок рівняння Нав'є – Стокса можна записати у вигляді функціональної залежності між критеріями подібностей:

$$\varphi(\text{Re}, F_r, Eu, H_0, L_1, L_2) = 0,$$

або

$$Eu = AR_e^m F_r^n H_0^p L^g. \quad (4.46)$$

4.9. Режими руху рідин

Експериментально виявлено два режими руху рідин – ламінарний і турбулентний. Ламінарний, або шаруватий, рух спостерігають за малих швидкостей або в трубах невеликого діаметра. За цього виду руху шари рідини ковзають один відносно другого, не перемішуючись (рис. 4.9).

Унаслідок дії сил тертя між шарами вони рухаються з різною швидкістю: максимальною в центрі і мінімальною – біля стінки.

З'ясовано, що середня швидкість за ламінарного руху становить половину швидкості по осі труби:

$$w_{\text{ср}} = w_{\text{max}} / 2. \quad (4.47)$$

За великої швидкості шари потоку перемішуються між собою і в кожній точці потоку відбувається різка зміна швидкості пульсації біля деякого її осередненого значення $w_{\text{ср}}$. Такий режим руху називають турбулентним (рис. 4.10).

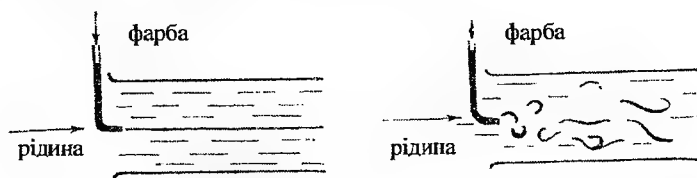


Рис. 4.9. Схема ламінарного режиму руху рідини

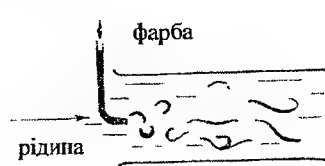


Рис. 4.10. Схема турбулентного режиму руху рідини

Різницю між істинною w_i і осередненою $w_{\text{ср}}$ швидкістю називають миттєвою пульсаційною швидкістю (рис. 4.11) і позначають як

$$\Delta w = w_i - w_{\text{ср}}. \quad (4.48)$$

Величина Δw має знакоперемінне значення, тому

$$w_i = w \pm \Delta w. \quad (4.49)$$

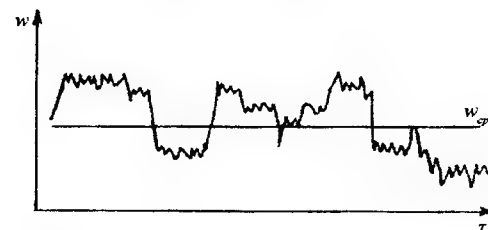


Рис. 4.11. Схема пульсацій швидкості руху потоку

Умовно розрізняють центральну зону, яку називають ядром потоку і яка характеризується турбулентним рухом, і гідродинамічно суміжну з шаром біля стінки труби, де відбувається перехід турбулентного руху в ламінарний (рис. 4.12).

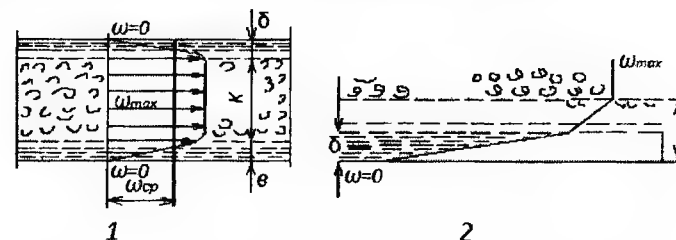


Рис. 4.12. Схема потоку рідини за турбулентного режиму руху:

1 – епіюра швидкості по перерізу труби; 2 – характер зміни швидкості в гідродинамічному шарі; δ – товщина примежового підшару; δ – гідродинамічний підшар

Усередині цього шару є тонкий підшар завтовшки δ , де в'язкість має переважний вплив на рух рідини.

Між ядром потоку і підшаром є перехідна зона, яку *разом із підшаром називають гідродинамічним примезовим шаром*.

Перехід від ламінарного руху до турбулентного відбувається тим легше, чим більша масова швидкість рідини, діаметр труби і менша в'язкість рідини. Зв'язок між цими величинами був встановлений Рейнольдсом в 1883 р., його названо критерієм Рейнольдса:

$$Re \equiv \frac{w d_e \rho}{\mu},$$

де w – швидкість потоку, м/с; d_e – еквівалентний діаметр, м; ρ – густина рідини, кг/м³.

Перехід від ламінарного до турбулентного руху характеризується критичним значенням $Re_{кр} \sim 2320$. За $Re < 2320$ рух є ламінарним, цю ділянку називають ділянкою стійкого ламінарного режиму руху. За значень $Re > 2320$ спостерігають прояв турбулентного режиму руху. У межах $2320 < Re < 10^4$ режим руху є нестійким (перехідним) турбулентним. Тільки за значень $Re > 10^4$ рух стає турбулентно стійким.

4.10. Рух неньютонівських рідин

Ньютонівські рідини характеризуються лінійною залежністю між дотичним зусиллям і градієнтом швидкості. Графічне зображення цієї залежності являє собою пряму лінію, яка виходить з початку координат (тангенс кута нахилу α дорівнює в'язкості) (рис. 4.13, пряма 1).

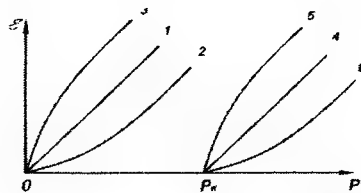


Рис. 4.13. Реологічні криві деяких рідин:

1 – ньютонівська рідина; 2 – псевдопластична рідина; 3 – ділатантна рідина; 4 – тіло Бінгама; 5 – пластичне ділатантне тіло; 6 – псевдопластичне тіло

До ньютонівських рідин належать всі гази і рідини з низькою молекулярною масою.

Закономірності руху неньютонівських рідин мають деякі особливості. Для них ця залежність є нелінійною. За характером залежності

$$\tau = f(dw/dx) \quad (4.50)$$

неньютонівські рідини поділяють на три класи.

До *першого класу* належать в'язкі (стаціонарні) рідини, для яких функція (4.50) не залежить від часу. За виглядом кривих руху в цьому класі розрізняють такі групи.

Бінгамівські пластичні рідини починають текти тільки після того, як до них прикладено зусилля.

За зусиль, менших від τ_0 , бінгамівські рідини подібні до твердих речовин. Для руху потоку треба зруйнувати їх структуру. За зусиль, більших від τ_0 , рух цих рідин не відрізняється від ньютонівських, тобто залежність також буде лінійною. За зменшення зусилля ($\tau < \tau_0$) структура бінгамівської рідини пружно відновлюється. До таких рідин належать цементні шлами, бетонні суміші і розчини, глиняні шлікери.

Для бінгамовських рідин рівняння кривої руху має вигляд:

$$\tau = \tau_0 + \mu_n \cdot dw/dx, \quad (4.51)$$

де τ_0 – початкове зусилля зсуву (межа текучесті) руйнування структури рідини, МПа; τ – зусилля, потрібне для руху рідини, МПа; μ_n – пластична в'язкість, аналогічна в'язкості звичайної рідини; dw/dx – градієнт швидкості, м/с.

Залежність (4.51) кривої руху називають рівнянням Бінгама – Шведова. Графічне зображення цієї кривої являє собою пряму, яка виходить на відстані τ_0 по осі τ (тангенсом кута нахилу $\tan \alpha = \mu_n$) (рис. 4.12, крива 4).

Поняття про уявну (позірну) в'язкість є загальним для неньютонівських рідин. Для бінгамівських рідин уявна в'язкість становить:

$$\mu_n = \frac{\tau - \tau_0}{\frac{dw}{dx}} \quad (4.52)$$

Із рівняння (4.52) випливає, що уявна в'язкість зменшується в міру збільшення градієнта швидкості.

Псевдопластичні рідини (рис. 4.13, крива 2) становлять найбільш чисельну групу в класі в'язких неньютонівських рідин. До них належать розчини полімерів, целюлози і суспензії з асиметричною структурою частинок, які, переплітаючись між собою, гальмують рух.

Для цих рідин дотичне зусилля, за Оствальдом, визначається рівнянням, яке називають ступеневим законом реології:

$$\tau = k \left(\frac{dw}{dx} \right)^m \quad (4.53)$$

де k, m – постійні величини.

Величина k тим більша, чим більша в'язкість, вона є мірою консистенції рідини. Величина $m < 1$, причому чим менше m , тим сильніше відрізняється псевдопластична рідина від ньютонівської (для останньої $m = 1$ і $k = \mu$).

Значення k і m для деяких суспензій наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Значення коефіцієнтів k і m для деяких суспензій

Вид суспензії	Концентрація, мас. %	К, М МПа · с m/m^2	m , безрозмірна величина
Глиняний шлікер	25	0,0565	0,229
Розчин карбоксиметилцелюлози	0,67	0,0031	0,715
Гашене вапно	33	0,0732	0,171
Паперова маса (скоп)	4	0,204	0,575
Водний розчин портландцементу	54,5	0,0256	0,153

Уявна в'язкість псевдопластичних рідин зменшується в міру збільшення градієнта швидкості

$$\mu_n = K \left(\frac{dw}{dx} \right)^{m-1} \quad (\text{за } m < 1). \quad (4.54)$$

Крива руху поступово переходить в пряму лінію з граничним значенням $\mu_n = \infty$ за нескінченно великого градієнта швидкості.

У логарифмічних координатах залежність $\tau = f(dw/dn)$ для псевдопластичних рідин є лінійною.

Ділатантні рідини (рис. 4.13, крива 3) являють собою суспензії з великим умістом твердої фази і рідини в кількості, достатньої для заповнення пустот між частинками. За повільного руху і в стані спокою вони подібні до ньютонівських рідин. За збільшення градієнта швидкості тверді частинки починають рухатися швидше і об'єм суспензії починає збільшуватися. При цьому рідини уже не достатньо для заповнення пустот, і уявна в'язкість збільшується.

Дотичне зусилля й уявну в'язкість визначають за формулою (4.53), але за значень $m > 1$. Прикладом таких рідин є суспензії крохмалю, рідинне скло, різноманітні клеї (з великим відношенням твердої фази до рідини).

До другого класу належать неньютонівські рідини, характеристики яких змінюються в часі. Для цих рідин уявна в'язкість визначається не тільки градієнтом швидкості зсуву, а і його тривалістю.

Звичайно для визначення характеристик рідини збільшують дотичне зусилля, а потім його зменшують. Якщо обидві криві руху збігаються, то це свідчить про те, що час не впливає на в'язкість. Але якщо уявна в'язкість змінюється в часі, то на графіку $\tau = f(dw/dx)$ будуть дві окремі криві у вигляді замкнутої петлі (рис. 4.14).

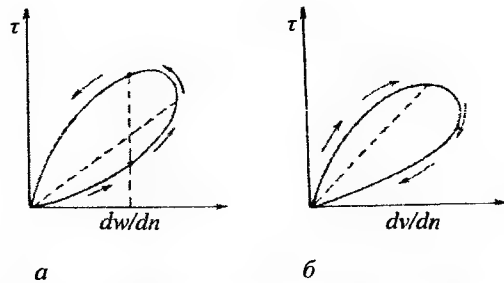


Рис. 4.14. Залежність між зусиллям зсуву і градієнтом швидкості:
а – реопектантна рідина; б – тиксотропна рідина

Залежно від результатів впливу дотичного зусилля на рідину розрізняють реопектантні і тиксотропні рідини. Уявна в'язкість реопектантних рідин збільшується в часі (див. рис. 4.14). До таких рідин належать суспензії бентонітових глин і деякі колоїдні розчини. Після відстоювання реопектантні рідини повертаються до первісного стану.

Тиксотропні рідини відрізняються від реопектантних рідин тим, що їх уявна в'язкість зменшується в часі (рис. 4.14, б). За тривалої дії дотичних зусиль структура цих рідин руйнується, збільшується текучість. Але після припинення зусилля рідина поступово відновлюється і перестає текти. Прикладом таких рідин є золошлакові суміші, лаки і фарби.

До *третього класу* належать в'язкопружні, або максвеллівські, рідини. Їх уявна в'язкість зменшується під дією зусилля, але після усунення навантаження в'язкопружні рідини частково відновлюють свою форму. Прикладом таких рідин є деякі смоли, пасти і речовини тістоподібної консистенції.

Уявна в'язкість усіх неньютонівських рідин значно перевищує в'язкість води.

П.А. Ребіндер запропонував всі неньютонівські рідини *поділити на рідиноподібні і твердоподібні*. До *рідиноподібних* віднесено ньютонівські, псевдопластичні, ділатантні, реопектантні і тиксотропні рідини, а до *твердоподібних* – пластичні рідини.

Більшість рідиноподібних речовин належать до структурованих колоїдних систем з розміром твердих частинок $10^{-6} \dots 10^{-4}$ мм.

Структуровані системи мають механічні властивості: міцність, пружність, в'язкість, пластичність, повзучість та інші.

Механічні властивості структурованих систем називають також *реологічними*. Всі структуровані системи підлягають закону Гука до деякого збільшення зусилля. Якщо зусилля більше за межу пружності, виникають пластичні деформації, які частково залишаються після припинення зусилля.

Пластична деформація залежить від величини зусилля (рис. 4.15). Відрізок ОА позначає початкове напруження до межі текучості P_k ; АВ – пластичний рух за постійного напруження; ВС – повне розвантаження.

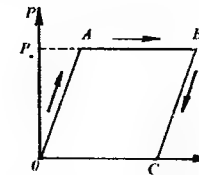


Рис. 4.15. Залежність пластичної деформації від дії зусилля зсуву

Залежність деформацій від прикладеного зусилля розглянуто за припущення, що вони не змінюються в часі. В дійсності деформації залежать від часу (рис. 4.16). Якщо до тіла в момент часу τ_1 прикладено зусилля P_0 , то в ньому встановлюється початкова пружна деформація $\epsilon_0 = A_1 B_1$. У міру збільшення зусилля P до $P_1 = \text{const}$ деформація почне повільно зростати по кривій $B_1 C_1$. У момент часу τ_2 дія зусилля припиняється, тобто $P = 0$, і деформація зменшується на величину $\epsilon_0 = C_1 D_1$, а потім повільно по кривій $D_1 E_1$.

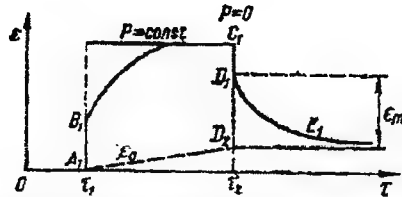


Рис. 4.16. Залежність деформації від дії зусилля зсуву в часі

Таким чином, після припинення зусилля зберігається залишкова деформація $\tau_2 D_1$ і тіло повільно відновлює свою форму. Відрізок $D_1 D_2$ являє собою еластичну деформацію ϵ_E . Пружна деформація є оборотною тому, що робота A , яка витрачається на її виконання, дорівнює роботі B відновлення первісної форми тіла. Пластична деформація в цьому розумінні є необоротною.

Для тиксотропних структурованих систем крива руху наведена на рис. 4.17.

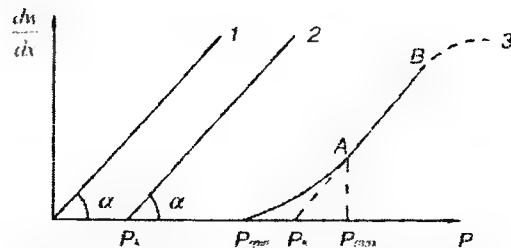


Рис. 4.17. Залежність між швидкістю деформації і зусиллям зсуву:

1 – для ньютонівської рідини; 2 – для тіла Бінгама;
3 – для структурованої системи

У таких системах після досягнення текучесті структура руйнується поступово в міру збільшення dw/dx . При цьому розрізняють три критичні зусилля зсуву – мінімальну межу текучесті $P_{\min}$, за якої починається рух; межу текучесті за Бінгамом $\geq P_k$, що відповідає відрізку на осі абсцис і перетині з продовженням прямолінійного відрізка кривої, і максимальна межа

текучесті $P_{\max}$, коли крива переходить в пряму лінію. За $P_{\max}$ структура є повністю зруйнованою.

Отже, $P_{\min} - A$ є ділянкою структурної (ефективної) в'язкості системи з частково зруйнованою структурою, яка після збільшення зсуву до $P_{\max}$ переходить в ділянку $A - B$ з повністю зруйнованою структурою; за подальшого збільшення зусилля, вищого за більше значення B , починається турбулентний рух.

За малих зусиль зсуву незначно зруйнована структура тиксотропно відновлюється, внаслідок цього рух системи відбувається без руйнування структури, тобто спостерігаємо явище повзучості. За великих швидкостей руху структура неабияк руйнується, а тиксотропно відновлюється незначною мірою. Тому для характеристики руху пластичних матеріалів застосовують не пластичну, а *ефективну в'язкість*, яка змінюється залежно від прикладеного зусилля.

Зміну в'язкості структурованої системи залежно від величини зусилля зсуву наведено на рис. 4.18. Аналіз засвідчує, що за зусиль P'_r ефективна в'язкість має найбільше значення η_0 практично незруйнованої структури в умовах повзучості. За зусиль зсуву P'_r повзучість переходить в рух з вимірною в'язкістю.

На відміну від ньютонівської рідини, структуровані системи, до яких належить пластична глиняна маса, не підлягають закону Ньютона. Це зумовлено наявністю в таких системах маломічної структурної сітки, для руйнування якої потрібно прикласти додаткове зусилля. Рух такої системи, за Бінгамом, починається з моменту, коли зусилля зсуву P є більшим за деяке критичне значення P_k , потрібне для руйнування системи. Такий рух називається пластичним, а критичне напруження зсуву P_k – межею текучесті. Вважають, що структура тіла Бінгама під дією критичного зусилля миттєво і повністю руйнується і перетворюється на рідину.

Тому для структурованих систем рівняння Ньютона переходить в рівняння Шведова – Бінгама:

$$P = P_k + \eta^* \frac{dw}{dx}, \quad (4.55)$$

де η^* – пластична в'язкість за пластичного руху системи.

У координатах $P - \frac{dw}{dx}$ пластична в'язкість η^* характеризується котангенсом кута нахилу α' прямої до осі абсцис, причому ця пряма починається з точки, віддаленої від початку координат на величину P_k (рис. 4.17, крива 2). Глинисті маси дуже близько описуються рівнянням Шведова – Бінгама. Із рівняння (4.55) випливає, що пластична в'язкість становить:

$$\eta^* = \frac{P_k - P}{dw/dx} = ctg\alpha'. \quad (4.56)$$

Для більшості структурованих систем залежність dw/dx від P не є прямою, а являє собою криву (рис. 4.17, крива 3). В таких системах після досягнення межі швидкості потоку маси центральна ділянка маси рухається суцільним стрижнем. На реологічній кривій залежності $\lg \eta - P$ (рис. 4.18) такий рух відображає ділянка максимальної пластичної (шведівської) в'язкості η^* . Характерною величиною такого руху є умовна межа практично незруйнованої структури P_r' .

Якщо зусилля зсуву поширюється по всьому перерізу потоку маси без зрізу і ковзання одних шарів відносно інших, то такий рух на реологічній кривій відображає ділянка руху маси із структурою, яка починає руйнуватись. Критерієм такого руху є умовна динамічна (бінгамівська) межа текучесті P_{k2} .

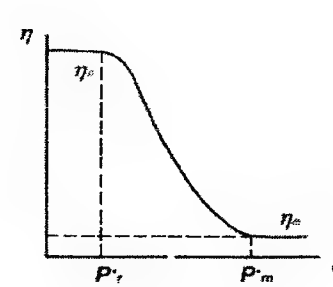


Рис. 4.18. Графік залежності ефективної в'язкості рідиноподібної структурованої системи від зусилля зсуву

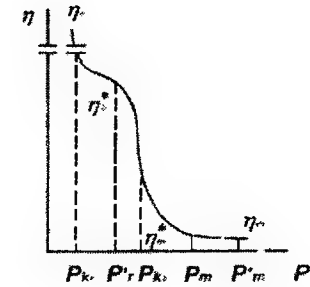


Рис. 4.19. Графік залежності ефективної в'язкості твердоподібної структурованої системи від зусилля зсуву

За зусиль зсуву, більших від P_r' , ефективна в'язкість зменшується до граничного значення η_m за зусилля $\geq P_m$, за якого структура системи повністю зруйнована, але ще за ламінарного руху.

За збільшення вмісту глини система переходить від рідиноподібної (структурованої) до твердоподібної (пластичної). В таких системах зміна в'язкості залежно від величини зусилля має більш складний характер (рис. 4.19). За зусиль зсуву P_{k1} , менших від умовної статичної межі текучесті, максимальна ньютонівська в'язкість η_0 практично незруйнованої структури є нескінченно великою. За підвищення зусилля до умовної межі практично ще не зруйнованої структури проявляється найбільша пластична (шведовська) в'язкість P_r' . За подальшого підвищення зусилля зсуву до P_m умовної динамічної, або бінгамівської, межі текучесті пластична в'язкість різко зменшується. Збільшення зусилля зсуву до P_m зумовлює подальше руйнування структури і рух з постійною мінімальною в'язкістю η_m .

Отже, у висококонцентрованих системах в'язкість визначається величиною зусилля зсуву, за збільшення якого вона зменшується: від максимальної η_0 за незруйнованої структури до мінімальної η_m за повністю зруйнованої структури.

Чим більша межа текучості і більша різниця $\eta_0 - \eta_m$, тим більша твердоподібність системи. Перехідними значеннями між η_0 і η_m є значення ефективної змінної в'язкості, яка зменшується з підвищенням зусилля зсуву.

Для рідкоподібних структурованих систем можна записати:

$$\eta_k > \eta(P) > \eta_m.$$

У твердоподібних пластичних системах унаслідок підвищення зусилля зсуву в'язкість від умовно постійного значення η_0 практично незруйнованої структури змінюється від найбільшої пластичної (шведівської) η_0^* до найменшої постійної в'язкості (бінгамівської) η_m практично гранично зруйнованої структури. Тобто

$$\eta_0 > \eta_0^* > \eta_m^* > \eta_m.$$

4.11. Перемішування мас

Перемішування широко застосовують у промисловості будівельних матеріалів для отримання емульсій, суспензій, будівельних розчинів і бетонних сумішей, а також для інтенсифікації хімічних, теплових і масообмінних процесів.

Способи перемішування і вибір апаратів для його здійснення залежать від мети перемішування й агрегатного стану матеріалів. Неабиякого поширення в технології будівельних матеріалів набули процеси перемішування твердих сипких матеріалів, а також перемішування в рідких середовищах.

Перемішування сипких твердих матеріалів

Зважаючи на те, що вихідна маса повинна бути максимально однорідною в будь-якому елементарному об'ємі, для

перемішування потрібен деякий мінімальний час. Основним призначенням процесу є максимальне збільшення початкової поверхні розподілу між компонентами суміші. Тому кількісне співвідношення між величиною поверхні розподілу S_t в певний момент перемішування і тривалість перемішування τ характеризують *кінетику перемішування*.

У процесі перемішування будь-якої кількості компонентів аналіз якості суміші звичайно виконують шляхом оцінки розподілення одного (ключового) компонента, застосовуючи методи статистичного аналізу.

За максимально можливої поверхні розподілу S_m (за $\tau \rightarrow \infty$) маємо:

$$S_t / S_m = F_t. \quad (4.57)$$

Приріст величини поверхні розподілу в наступний момент часу $\tau + 1$ повинен бути пропорційний різниці між максимальною і фактичною поверхнями розподілу:

$$S_{\tau+1} - S_t = \varepsilon(S_m - S_t),$$

де ε – коефіцієнт пропорційності.

Величина поверхні розподілу в момент τ пов'язана відношенням

$$S_t : S_m = F_t.$$

За допомогою методу математичної статистики доведено, що

$$S_t = S_m(1 - e^{-\tau C}), \quad (4.58)$$

де $C = \ln \frac{1}{1 - \varepsilon}$.

Залежність (4.58) є рівнянням кінетики перемішування.

До кінетичного аналізу процесу перемішування можна підійти і з іншої позиції. Принципово процес перемішування можна розглядати як взаємну дифузію часток суміші, тобто як дифузійний процес. Швидкість молекулярної дифузії описують першим законом Фіка:

$$\frac{dx}{d\tau} = K(C_0 - C), \quad (4.59)$$

де K – величина, яка залежить від коефіцієнта дифузії, товщини дифузійного шару і поверхні контакту компонентів; C_0 – концентрація насичення; C – концентрація в об'ємі.

Аналізуючи процес перемішування, концентрацію матеріалу можна замінити величиною поверхні розподілу. При цьому величини C_0 і C відповідно замінюють на величини S_M і S_T , оскільки $C_0 > C_0$; $S_M > S_T$. Тоді

$$\frac{dS}{d\tau} = K(S_M - S_T),$$

після інтегрування:

$$S_T = S_M(1 - e^{-tk}). \quad (4.60)$$

Це рівняння (4.60) збігається з раніше виведеним рівнянням (4.58). Рівняння кінетики (4.60) в представленому вигляді недостатньо для визначення S_T , через те що S_M не може бути визначене експериментально.

Перемішування суміші характеризується нескінченно великою різноманітністю взаємного розміщення зерен. Співвідношення компонентів суміші в довільних точках – величина випадкова, тому якість перемішування оцінюють за допомогою методів математичної статистики, аналізуючи за *ключовим компонентом*, суміш при цьому вважають умовно двокомпонентною.

Найбільшого поширення як критерій оцінки якості перемішування набув коефіцієнт неоднорідності А. Ластовцева який визначають за формулою:

$$V_c = \frac{\sigma - 100}{\bar{C}} = \frac{100}{\bar{C}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}{(n-1)}}, \quad (4.61)$$

де σ – середнє квадратичне відхилення вмісту ключового компонента в пробі; C_i – масова, або об'ємна, частка ключового компонента в i - пробі; $\bar{C}$ – середнє арифметичне значення C ; n – кількість проб. Коефіцієнт неоднорідності являє собою середнє відносне відхилення. Очевидно, що вираз $B = 100 - V_c$ відображає ступінь перемішування.

Якість перемішування вважають задовільною за $V_c = 8...6\%$, доброю за $V_c = 6...4\%$ і дуже доброю за $V_c < 4\%$. Коефіцієнт неоднорідності залежить від маси проби і її гранулометричного складу.

Конструкції апаратів для перемішування твердих (сипких) матеріалів – *змішувачів* залежать переважно від методу перемішування (пересипання, перелопачення, псевдорозрідження тощо), фізико-механічних, хімічних та інших властивостей окремих компонентів та їх сумішей, а також від належної якості й інтенсивності перемішування.

Перемішування відбувається в змішувачах, конструкція яких залежить від характеру суміші і необхідної продуктивності. Різноманітність особливостей процесу перемішування, зумовлених різними фізико-механічними властивостями матеріалів і вимогами до технологічного процесу, зумовили створення великої кількості апаратів для перемішування. Усі вони можуть бути поділені на декілька основних груп: барабанні, шнекові, лопатеві, ланцюгові, циркуляційні, відцентрові, пневмо- і вібростмішувачі.

Розглянемо деякі типи змішувачів періодичної і неперервної дії, які застосовують у промисловості будівельних матеріалів (рис. 4.20).

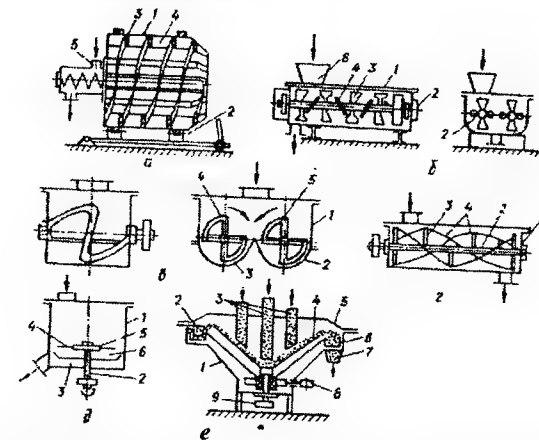


Рис. 4.20. Схеми змішувачів для перемішування зернистих матеріалів:
а – барабанні; б – шнекові; в – лопатеві; г – ланцюгові;
д – циркуляційні; е – відцентрові

Барабанні змішувачі (рис. 4.20, а) являють собою циліндричний, циліндроконічний або призматичний корпус 1, який обертається на опорних роликах 2 зі швидкістю 6...8 об./хв. В барабані розміщені внутрішні спіральні ребра 3 і повздовжні полиці для кращого перемішування. Завантаження і вивантаження відбувається за допомогою шнека 5. Під час обертання шнека в одному напрямку відбувається завантаження, в протилежному – вивантаження. Барабанні змішувачі застосовують для перемішування сухих порошкоподібних матеріалів. Через те що процес тривалий, такі змішувачі є малоефективними і замінюються на більш ефективні.

Шнекові змішувачі (рис. 4.20, б) застосовують для перемішування сухих матеріалів, а також для приготування густих і в'язких каше-і і тістоподібних мас і паст. За конструкцією вони можуть бути одно- і двовальними. Різні конструкції цих змішувачів відрізняються переважно довжиною корпусу і конфігурацією лопатей.

У шнекових лопатевих змішувачах робочими органами є вали-шнеки з Т-подібними гвинтовими лопатями. Більшість шнекових лопатевих змішувачів мають один вал. Для покращення якості перемішування в деяких конструкціях одновальних змішувачів використовують привід, який здійснює обертання з одночасним зворотно-поступальним рухом вала.

Крім одновальних, застосовують також двовальні лопатеві змішувачі. Двовальний протитечійний змішувач складається з горизонтального корпусу (корита) 1 і двох валів 2 і 3, на яких по чергову закріплені лопаті двох видів: прямі 4, які перемішують масу, і зігнуті, які її перемішують. Останні встановлюють так, щоб вздовж вала 2 утворювалась гвинтова лінія.

Матеріал надходить у змішувач через воронку 6 і рухається вздовж вала 2 до кінця змішувача, де маса лопатевим колесом передається на задній шнек і далі рухається у зворотному напрямку. Внаслідок того, що швидкість обертання вала 2 більша за швидкість

вала 3, маса інтенсивно переміщується і переміщується до вивантажувального отвору.

За потреби корпус змішувача виготовляють з водяною оболонкою для обігрівання або охолодження маси, при цьому, премішування інколи поєднують з іншими технологічними операціями (сушінням).

Процес перемішування в таких змішувачах відносно тривалий. Але в цих апаратах можна створювати однонаправлений рух матеріалу вздовж корпусу, що дає змогу використовувати їх для неперервної роботи.

Лопатеві Z-подібні змішувачі – різновид шнекових змішувачів (рис. 4.20, в) має два напівциліндричні днища 2 і 3, в яких обертаються назустріч один одному з різною кількістю обертів два лопатевих вали 4 і 5 Z-подібної форми. Швидкість обертання становить 10...50 об./хв. Під час зустрічного руху кожна з лопатей переміщує масу до клиноподібного сідла і розділяє її на частини. Розділені частини маси частково підхоплюються лопаттю паралельного вала і вминаються в масу. Одночасний процес такої обробки сприяє перетиранню й утворенню нових поверхонь суміші. Такі змішувачі придатні для виготовлення густих паст, але вони малоефективні.

Змішувачі ланцюгові (рис. 4.20, г) являють собою корито-подібний або циліндричний корпус 1, в якому обертається вал 2 зі стрижнями 3. На вершинах стрижнів закріплені плоскі сталеві стрічки 4, зігнуті по гвинтовій лінії. Змішувачі працюють в неперервному режимі, але характеризуються неінтенсивним перемішуванням.

Змішувачі циркуляційні характеризуються інтенсивною циркуляцією матеріалів, які перемішуються в псевдорозрідженому стані (рис. 4.20, д). Вони належать до високоефективних змішувачів для сипких матеріалів неперервної дії. Конструктивно вони являють собою циліндричний або багатогранний корпус 1, в якому на консольному валу 2 обертається ротор, який складається із верхнього диска 3 з центральним отвором і нижнього диска 4 (із

загнутими догори краями. Під час обертання ротора з відцентровою швидкістю $5...8 \text{ мс}^{-1}$ в апараті відбувається інтенсивна циркуляція сипкого матеріалу, який переходить в стан, близький до псевдорозрідження.

Змішувачі відцентрові характеризуються високою ефективністю перемішування, низькими енерговитратами і високою продуктивністю на одиницю об'єму апарата (рис. 4.20, е).

Змішувач складається з корпусу 1 з кришкою 5, який обертається зі швидкістю близько 5 об/с, конусного ротора 4, який рухомо обертається зі швидкістю 2...3 об/хв, короба 6, патрубків подачі вихідних матеріалів 3, привода ротора 9 і збірного короба 8. Вивантаження перемішаного матеріалу відбувається через патрубок 7 за допомогою скребка 2. Процес перемішування полягає в такому. Один з матеріалів подається через патрубок 3 в центральну частину ротора і під дією відцентрової сили розподіляється по всій його поверхні. Товщина шару матеріалу зменшується в міру віддалення від осі обертання ротора. Решта компонентів суміші подається через інші патрубки 3, накладання двох або більше шарів під час подальшого сумісного руху по поверхні конуса сприяє інтенсивному перемішуванню. Потім суміш надходить в збірний короб і виходить у вигляді готової перемішаної суміші через патрубок 7.

Завдяки такій конструкції змішувача можна одночасно зволожувати суміш до 8...16%. Послідовне розміщення декількох таких апаратів дає можливість організувати неперервний процес перемішування.

Пневмозмішувачі – це апарати, в яких процес перемішування зернистих матеріалів відбувається в псевдорозрідженому шарі повітря. Такі апарати вирізняються високою ефективністю, малою тривалістю процесу, відсутністю рухомих конструктивних елементів, але потребують ефективної системи пилоочищення.

Віброзмішувачі – це апарати, в яких перемішування відбувається завдяки циркуляції сипкого матеріалу на поверхні, яка коливається за допомогою вібрації високої частоти.

Перемішування в рідких середовищах. Незалежно від того, яке середовище перемішується з рідиною – газ, рідина чи твердий сипкий матеріал, – розрізняють два основних способи перемішування в рідинах: механічний (за допомогою мішалок різних конструкцій) і пневматичний (стисненим повітрям або інертним газом). Крім того, застосовують перемішування в трубопроводах за допомогою насосів і сопел.

Найбільш важливими характеристиками змішувачів, які можуть бути покладені в основу їх порівняльної оцінки, є *ефективність змішувача й інтенсивність його дії*.

Ефективність змішувача характеризує якість перемішування і може бути виражена по-різному залежно від мети процесу (стосовно отримання суспензій це ступінь рівномірності розподілення твердої фази в об'ємі апарата, для процесу інтенсифікації теплових і масообмінних процесів – відношення коефіцієнтів тепло- і масовіддачі під час перемішування і без нього).

Інтенсивність перемішування визначається часом досягнення заданого технологічного результату або кількістю обертів за фіксованої тривалості процесу. Чим вища інтенсивність перемішування, тим менша тривалість процесу.

Механічне перемішування здійснюють за допомогою мішалок, яким передається обертальний рух або безпосередньо від електродвигуна, або через редуктор чи клинопасову передачу. Відомі також мішалки із зворотно-поступальним рухом, які мають привід від механічного або електромагнітного вібратора.

Процес перемішування механічними мішалками зводиться до зовнішньої задачі гідродинаміки – обтікання твердих тіл потоком рідини.

Задача зовнішнього обтікання тіл в умовах перемішування може бути розв'язання за допомогою рівняння Нав'є – Стокса і нерозривності потоку. Точне розв'язання цієї задачі дуже складне, воно можливе для окремих випадків. Тому для розв'язання цієї задачі застосовують теорію подібності. Як впливає з

узагальненого рівняння гідродинаміки (4.46), вимушений стаціонарний рух описують критеріальним рівнянням:

$$E_u = f(R_e, F_r, \Gamma_1, \Gamma_2 \dots),$$

де $\Gamma_1, \Gamma_2 \dots$ – симплекси геометричної подібності.

Для опису процесу перемішування використовують модифіковані критерії Егілера (F_{y_m}), Рейнольдса (R_{e_m}) і Фруда (F_{r_m}), які можна отримати шляхом перетворення звичайних виразів критеріїв. Замість лінійної швидкості рідини в модифіковані критерії підставляють величину nd , пропорційну обводовій швидкості мішалки $\omega_{об}$:

$$\omega_{об} = \pi nd,$$

де n – кількість обертів мішалки; d – діаметр мішалки.

Як визначальний лінійний розмір у всіх критеріях використовують діаметр d мішалки.

Підставляючи значення цих величин у відповідні критерії, отримуємо вирази для модифікованих критеріїв подібності:

$$R_{e_m} = \frac{nd \cdot d\rho}{\mu} = \frac{nd^2\rho}{\mu}; \quad F_{r_m} = \frac{n^2 d^2}{gd} = \frac{n^2 d}{g}; \quad E_{u_m} = \frac{\Delta p}{\rho(nd)^2}.$$

До критерію Ейлера входить рівняння тисків Δp між передньою (з боку набігання потоку) і задньою площиною лопаті мішалки. Цей перепад тисків долається зусиллям P , прикладеним до вала, виражають його через потрібну потужність N , яка передається рідині. Величина N пропорційна добутку зусилля на валу й обводовій швидкості:

$$N \sim P(nd).$$

Тоді перепад тисків можна замінити пропорційною величиною:

$$\Delta p = \frac{N}{S} \sim \frac{N}{(nd)S} \sim \frac{N}{nd^3},$$

де $S \sim d^2$ – площа, на якій розподілено зусилля P .

Підставляємо значення Δp у вираз критерію E_{u_m} , отримуємо:

$$E_{u_m} = \frac{N}{\rho n^3 d^5} \equiv K_N.$$

Критерій E_{u_m} називають критерієм потужності і позначають K_N .

Узагальнене рівняння гідродинаміки для процесів перемішування набуває вигляду:

$$K_N = f(R_{e_m}, F_{r_m}, \Gamma_1, \Gamma_2 \dots), \quad (4.62)$$

або

$$K_N = AR_{e_m}^m F_{r_m}^n \Gamma_1^p \Gamma_2^g \dots \quad (4.63)$$

Сила тяжіння впливає на утворення хвиль і вирів на вільній поверхні рідини. За наявності в апараті відбивальних перегородок або за ексцентричного розміщення вала в апараті впливом сили тяжіння можна знехтувати. В такому випадку з рівняння (4.62) можна вилучити критерій Фруда:

$$K_N = f(R_{e_m}, \Gamma_1, \Gamma_2 \dots), \quad (4.64)$$

або

$$K_N = A'R_{e_m}^{m'} \Gamma_1^{p'} \Gamma_2^{g'} \dots \quad (4.65)$$

Залежності (4.64) і (4.65) застосовують для розрахунку потужності N , потрібної для мішалки.

Значення коефіцієнтів A ; A' і показники степенів визначають за результатами дослідів; вони залежать від типу мішалки, конструкції апарата і режиму перемішування.

Для спрощення розрахунків дослідні дані величин потужності представляють у вигляді графічних залежностей критерію потужності K_N від модифікованого критерію Рейнольдса R_{e_m} з геометричними $\Gamma_1, \Gamma_2 \dots$ і критерієм Фруда F_{r_m} .

Графік залежності K_N від R_{e_m} для основних типів мішалок, побудований на підставі експериментальних досліджень, наведений на рис. 4.21.

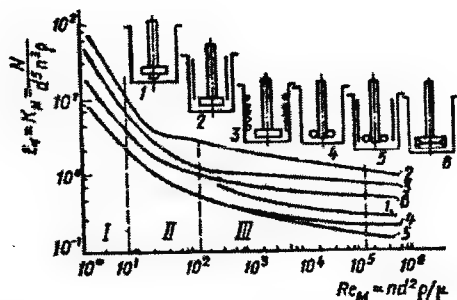


Рис. 4.21. Залежність критерію K_N від Re_m для мішалок:

1 – дволопатевої; 2 – дволопатевої з перегородками; 3 – дволопатевої із змійовиком; 4 – пропелерної; 5 – пропелерної з перегородками; 6 – турбінної

Розрізняють два режими змішування механічними мішалками: ламінарний і турбулентний. За ламінарного режиму ($Re_m < 30$), що відповідає неінтенсивному перемішуванню, коли рідина плавно обтікає кромки лопаті мішалки, захоплюється лопатями й обертається разом з ними, тобто перемішуються тільки ті шари рідини, які безпосередньо прилягають до лопатей.

Збільшення швидкості обертання призводить до збільшення опору рідини, внаслідок турбулізації примежового шару й утворення турбулентного кормового сліду в просторі за рухомими лопатями. За $Re_m > 10^2$ виникає турбулентний режим. На ділянці розвиненої турбулентності $Re_m > 10^5$ критерій K_N практично не залежить від Re_m .

Наведені залежності для розрахунку потужності, обертів стосуються перемішування ньютонівських рідин.

Механічні змішувачі складаються з трьох основних частин: мішалки, вала і привода. Мішалки є робочим елементом, який закріплюється на вертикальному, горизонтальному або нахиленому валі. Привод може працювати прямо від електродвигуна (для швидкохідних мішалок), або через редуктор чи клинопасову передачу.

За будовою лопатей розрізняють мішалки лопатеві, пропелерні, турбінні і спеціальні (рис. 4.22).

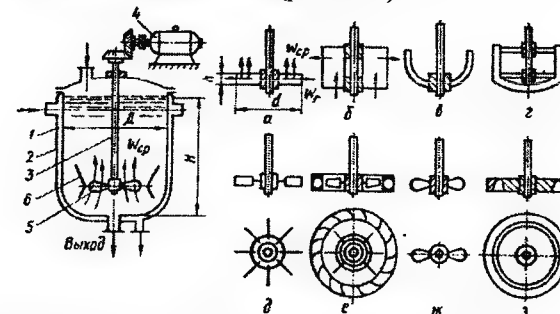


Рис. 4.22. Схеми мішалок для перемішування рідин:

а – лопатева; б – листова; в – якірна; г – рамкова; д – турбінна відкритого типу; е – турбінна закритого типу; ж – пропелерна; з – вібраційна

Механічні мішалки являють собою циліндричний або багатограний корпус 1 з водяною оболонкою 2 або без неї, в якому по осі або ексцентрично розміщений вал 3, який обертається за допомогою привода 4. На нижньому кінці вала розміщується робочий орган змішувача – мішалка (ротор) 5. Для створення направленного руху рідини в корпусі встановлюють дифузори 6.

За типом створюваних потоків рідини в апараті виокремлюють мішалки, які забезпечують переважно тангенціальний, радіальний і осьовий рух. Тангенціальний рух – це рух по концентричних колах, паралельних площині обертання мішалки; радіальний рух здійснюється від мішалки до стінок апарата; осьовий рух – вздовж осі обертання.

Лопатева мішалка являє собою апарат, в якому обертається вертикальний (нахилений) вал з закріпленими двома або більше лопатями прямокутного перерізу. До лопатевих мішалок належать деякі мішалки спеціального призначення – якірні, рамкові і листові.

Лопатеві мішалки застосовують для змішування рідин, в'язкість яких не перевищує $10^3 \text{ Па}\cdot\text{С}$. Ці мішалки не придатні для неперервної роботи.

Листові мішалки застосовують для змішування малов'язких рідин, в'язкість яких менша за $50 \text{ Па}\cdot\text{С}$, для інтенсифікації теплових процесів, хімічних реакцій в об'ємі і розчинення.

Обводова швидкість лопатевих і листових мішалок залежно від в'язкості рідини змінюється в широких межах – $0,5 \dots 5,0 \text{ с}^{-1}$.

Пропелерні мішалки. Робочою частиною пропелерної мішалки є пропелер – пристрій з декількома фасонними лопатями, вигнутими по профілю гребного гвинта. Найбільшого поширення набули трилопатеві пропелери.

Турбінні мішалки мають форму крильчатки з плоскими, нахиленими або криволінійними лопатями, закріпленими, як правило, на вертикальному валу. Турбіни бувають відкритого і закритого типу. Мішалки відкритого типу являють собою ротор з радіально розміщеними прямими, нахиленими або криволінійними лопатями. Закриті мішалки мають два диски з отворами для пропускання рідини. Турбінні мішалки забезпечують інтенсивне змішування в усьому об'ємі апарата, їх застосовують для сумішей, які в процесі перемішування змінюють свою в'язкість.

Кількість обертів мішалок становить $2 \dots 5 \text{ с}^{-1}$, а обводова швидкість – $3 \dots 8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

До спеціальних мішалок належать барабанні, вібраційні, дискові.

Барабанні мішалки (рис. 4.22) складаються з двох циліндричних кілець, з'єднаних між собою вертикальними лопатями прямокутного перерізу. Висота такої конструкції становить $1,5 \dots 1,6$ її діаметра. Мішалки створюють значний вертикальний потік і застосовуються для газорідних реакцій, отримання емульсій і змулювання осадів.

Дискові мішалки (рис. 4.24) являють собою один або декілька дисків, які обертаються на вертикальному валі з великою швидкістю. Діаметр дисків становить $0,1 \dots 0,15$ діаметра апарата. Обводова швидкість – в межах $5 \dots 35 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Дискові мішалки застосовують для перемішування малов'язких і в'язких сумішей в об'ємах до 4 м^3 .

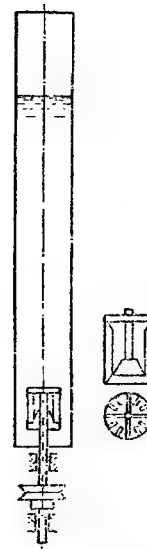


Рис. 4.23. Барабанна мішалка



Рис. 4.24. Дискова мішалка

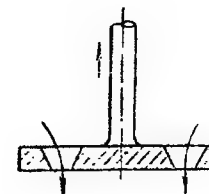


Рис. 4.25. Схема диска вібраційної мішалки

Вібраційні мішалки мають вал, на якому закріплені один або декілька перфорованих дисків (рис. 4.25). Диски здійснюють зворотно-поступальний рух, за якого досягається інтенсивне змішування. Вібраційні мішалки виготовляють діаметром до 300 мм і об'ємом до 3 м^3 .

Пневматичне перемішування стисненням повітрям або газом застосовують, коли рідини, які вирізняються значною хімічною активністю, швидко руйнують механічні мішалки. Його не застосовують для обробки летких рідин, цей процес може також супроводжуватись окисненням або обсмолюванням.

Витрати повітря залежно від інтенсивності перемішування становлять $0,4 \dots 1,0 \text{ м}^3/\text{хв}$.

Змішування в трубопроводах є одним з найпростіших методів перемішування рідин під час їх транспортування. Змішування в трубопроводі відбувається під дією турбулентних пульсацій. Цей метод можна застосовувати за умови, що рух турбулентний і

трубопровід має довжину, достатню для перебування рідини в ньому впродовж певного часу. Інколи в трубопроводі розміщують спеціальні вставки, насадки й інжектори.

Запитання для самоперевірки

1. Що таке рідина? Як розрізняють рідини?
2. Які рідини належать до ньютонівських, а які – до неньютонівських?
3. Наведіть визначення гідростатичного тиску і назвіть його властивості.
4. Дайте визначення закону Паскаля. Які гідравлічні машини працюють на основі цього закону?
5. Як можна визначити середню швидкість потоку рідини?
6. Які режими руху рідин вам відомі?
7. Що таке критерій Рейнольдса? У чому його фізичний зміст і практичне значення?
8. Як залежить в'язкість від температури і тиску?
9. Як пов'язані між собою динамічна і кінематична в'язкість?
10. Дайте визначення гідростатичного тиску, назвіть його властивості.
11. Сформулюйте закон Паскаля. Які гідростатичні машини працюють на основі цього закону?
12. Як визначити середню швидкість потоку?
13. У чому полягає геометричний і енергетичний зміст членів рівняння Бернуллі?
14. Як можна оцінити якість перемішування сухих мас, рідин?
15. Які апарати використовують для перемішування твердих (сипких) мас?

Розділ V. ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ

Значна кількість технологічних процесів виробництва будівельних матеріалів і виробів пов'язана з використанням теплової енергії. До теплових належать процеси, швидкість яких визначається швидкістю підведення або відведення тепла. Обмін теплом між тілами відбувається довільно в напрямку від більш нагрітого до менш нагрітого. *Поверхня тіла, яка віддає або сприймає тепло, називається поверхнею теплообміну.* Між матеріалом і теплоносієм відбувається складний процес тепло- і масообміну, який супроводжується фізико-хімічними перетвореннями.

Згідно з класифікацією теплові процеси поділяють так:

- процеси без зміни агрегатного стану;
- процеси зі зміною агрегатного стану.

До перших належать нагрівання, охолодження, прокалювання, випалювання; до других – випарювання, конденсація, твердіння і плавлення.

Як джерела теплової енергії в технології будівельних матеріалів і виробів використовують тепло горіння палива (теплоносій – димові гази); тепло екзотермічних реакцій (теплоносій – продукти реакцій); електричну енергію.

Названі джерела тепла застосовують для безпосереднього нагрівання. Широко застосовують також проміжні теплоносії: водяну пару, мінеральні оливи, висококиплячі органічні рідини та їх пари, розплавлені метали і солі.

В розділі розглянуто основні теоретичні положення теплообміну між теплоносієм і матеріалом. Ці процеси поділяють на зовнішні і внутрішні. Під зовнішніми розуміють процес обміну теплом і масою поверхні матеріалу і навколишнім середовищем; під внутрішніми – поширення тепла і маси в об'ємі матеріалу.

5.1. Основи теплообміну

Теплопровідність як спосіб передавання тепла

Розрізняють три способи передавання тепла: теплопровідність, конвекція і теплове випромінювання.

Кількість тепла, яке передається завдяки теплопровідності, визначають за рівнянням Фур'є, згідно з яким *кількість тепла* dQ , *яке проходить через площину* dF *за час* $d\tau$, *прямо пропорційна градієнту температури* $\frac{dt}{dx}$, тобто:

$$dQ = -\lambda \frac{dt}{dx} dF d\tau. \quad (5.1)$$

Коефіцієнт пропорційності λ в рівнянні (5.1) означає *кількість тепла, яке проходить через 1 м² поверхні за 1 год на відстань 1 м за різниці температур на цій відстані 1 °C, називається коефіцієнтом теплопровідності (Вт/м·°C)*.

Коефіцієнт теплопровідності є фізичною характеристикою речовини і залежить від її природи, агрегатного стану і температури.

Процес поширення тепла завдяки теплопровідності може бути описаний математично у вигляді диференціального рівняння. Виведення рівняння ґрунтується на законі збереження енергії, згідно з яким кількість уведеного ззовні тепла за відрізок часу $d\tau$ дорівнює зміні внутрішньої енергії (ентальпії).

Диференціальне рівняння теплопровідності Фур'є має такий вигляд:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (5.2)$$

де величина $\frac{\lambda}{c\rho}$ називається *коефіцієнтом температуропровідності*, який характеризує здатність матеріалу змінювати температуру в часі.

Якщо позначити $\frac{\lambda}{c\rho} = a$ і $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = \nabla^2 t$, то рівняння (5.2) можна записати в загальному вигляді:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t. \quad (5.3)$$

Зміна кількості тепла в матеріалі може відбуватися і завдяки внутрішнім джерелам (наприклад, хімічним реакціям). Якщо потужність такого джерела для одиниці об'єму позначити g_r , то для всього об'єму вона становитиме $g_r dV$. Таким чином, рівняння (5.3) матиме вигляд:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{g_r}{c\rho}. \quad (5.4)$$

Передавання тепла шляхом конвекції

Конвективний теплообмін можливий в рухомих середовищах. Процес конвективного теплообміну залежить від режиму руху теплоносія, його фізичних властивостей, геометрії виробу і стану поверхні теплообміну.

З'ясовано, що за обтікання твердого тіла рідиною вздовж його поверхні утворюється особливий примежовий шар рідини. Якщо потік рідини постійний і має ламінарний характер, структура примежового шару залишається незмінною. При цьому тепло від стінки в ядро потоку передається завдяки явищу теплопровідності.

У промислових теплових апаратах режим руху рідини має турбулентний характер. Під час такого руху основної частини потоку ламінарний примежовий шар на деякій відстані від краю стінки також починає отримувати імпульси, які зумовлюють турбулентний рух значної товщі примежового шару.

Якщо швидкість конвективного переміщення одиночного елемента середовища відносно осей X, Y, Z позначити w_x, w_y і w_z , а зміну його температури під час руху відносно осей – як $\frac{\partial t}{\partial x}, \frac{\partial t}{\partial y}$ і $\frac{\partial t}{\partial z}$, то конвективна зміна температури буде виражатися сумою:

$$\frac{\partial t}{\partial x} w_x + \frac{\partial t}{\partial y} w_y + \frac{\partial t}{\partial z} w_z.$$

Відповідно повна зміна температури елементарного об'єму середовища $Dt/\partial\tau$ складатиметься з локального $\partial t/\partial\tau$ і конвективного:

$$\frac{Dt}{\partial\tau} = \frac{\partial t}{\partial\tau} + \frac{\partial t}{\partial x} w_x + \frac{\partial t}{\partial y} w_y + \frac{\partial t}{\partial z} w_z. \quad (5.5)$$

Замінімо в рівнянні (5.5) локальну зміну температури повною і отримаємо рівняння конвективного обміну Фур'є – Кіргофа:

$$\frac{\partial t}{\partial\tau} + \frac{\partial t}{\partial x} w_x + \frac{\partial t}{\partial y} w_y + \frac{\partial t}{\partial z} w_z = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (5.6)$$

або

$$\frac{\partial t}{\partial\tau} + W \text{grad} t = a \nabla^2 t. \quad (5.7)$$

У випадку конвекції тепловіддачу визначають за рівнянням Ньютона – Ріхмана:

$$dQ = a(t_p - t_{\text{ст}}) dF d\tau, \quad (5.8)$$

де a – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·С); t_p – температура рідини, °С; $t_{\text{ст}}$ – температура стінки, °С.

Коефіцієнт тепловіддачі відображає кількість тепла, що передається поверхнею завбільшки 1 м² до стінки або від неї до навколишнього середовища протягом 1 год за різниці температур поверхні стінки і середовища 1 град.

Порівняльний аналіз рівнянь (5.3) і (5.8) дає змогу отримати залежність для визначення коефіцієнта тепловіддачі:

$$a = -\frac{\lambda}{(t_p - t_{\text{ст}})} \cdot \left(\frac{\partial t_p}{\partial x} \right). \quad (5.9)$$

Процес перенесення тепла на межі з поверхнею може бути описаний законом Фур'є (5.3) і Ньютона – Ріхмана (5.8).

За умови рівності правих частин цих рівнянь отримаємо диференціальне рівняння тепловіддачі, яке характеризує умови теплообміну на межі з поверхнею:

$$a = (t_p - t_{\text{ст}}) = -\lambda \frac{\partial t_p}{\partial x}. \quad (5.10)$$

Тепло за межами примежового шару передається одночасно як унаслідок теплопровідності, так і шляхом конвекції.

Передачу тепла внаслідок теплопровідності в елементарному об'ємі середовища описують диференціальним рівнянням (5.2):

$$\frac{\partial t}{\partial\tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right).$$

Теплообмін на межі рухомого середовища і поверхні твердого матеріалу називають тепловіддачею.

За турбулентного руху рідини передача тепла від поверхні теплообміну відбувається переважно шляхом конвекції. Безпосередньо біля стінки, де відповідно до теорії примежового шару завжди є ламінарний підшар, тепло передається тільки завдяки теплопровідності. Тепло, яке передається стінці за сталого теплообміну і будь-якого режиму руху рідини може бути виражене законом Фур'є (5.1):

$$dQ = -\lambda \frac{\partial t_p}{\partial x} dF d\tau,$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності рідини; $\partial t_p / \partial x$ – градієнт температури рідини в ламінарному підшарі.

Коефіцієнт тепловіддачі a не є постійною величиною: для тієї самої речовини він може змінюватись у дуже широких межах. На його величину впливає чимало факторів: фізичні властивості рідини або газу (густина, в'язкість, теплопровідність, теплоємність та ін.); швидкість і характер руху, форма поверхні, ступінь її шорсткості тощо.

Таким чином, коефіцієнт тепловіддачі, на відміну від коефіцієнта теплопровідності, не є фізичним параметром рідини або газу. Його визначення за допомогою розрахункових методів пов'язано із значними труднощами. Звичайно a визначають за допомогою методів теорії подібності із диференціальних рівнянь теплообміну, які встановлюють залежність між параметрами процесу в критеріальній формі.

Диференціальними рівняннями конвективного теплообміну (5.3) і тепловіддачі (5.8) описують складне перенесення тепла. Для більшості випадків ці рівняння нерозв'язні, тому не можуть бути застосовані для прямого визначення числових значень коефіцієнта тепловіддачі. На практиці користуються критеріальними рівняннями, отриманими із диференціальних рівнянь за методами теорії подібності.

Розглянемо умови подібності на межі розподілу поверхні твердого тіла і примежового шару (рис 5.1).

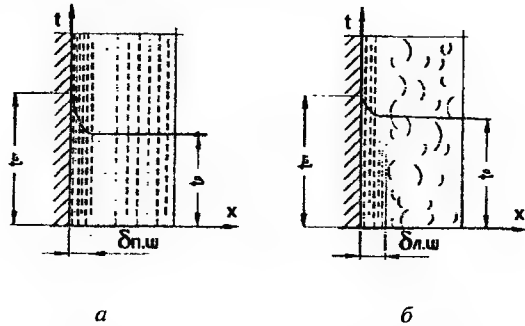


Рис. 5.1. Характер зміни температури рідини в примежовому шарі під час її руху:

a – у ламінарному режимі; *b* – у турбулентному режимі

Кількість тепла, яке передається завдяки теплопровідності, згідно із законом Фур'є дорівнює $dQ = -\lambda \frac{\partial t}{\partial \delta} dF d\tau$, де δ – товщина шару; кількість тепла, яке передається внаслідок тепловіддачі, згідно із законом Ньютона – Ріхмана становить $dQ = a(t_{ст} - t_p) dF d\tau$.

За сталого потоку кількість тепла, яке передається через примежовий шар до стінки і навпаки, однакова:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial \delta} dF d\tau = a(t_{ст} - t_p) dF d\tau.$$

Розділимо праву частину на ліву, при цьому відкинемо знаки математичних операторів і замінимо δ на l – геометричний розмір, отримаємо критерій Нусельта:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial \delta} = a \Delta t; \quad \frac{a l}{\lambda} = \frac{a l}{\lambda} \equiv Nu.$$

Критерій Нусельта, який характеризує подібність процесів теплоперенесення на межі між стінкою і потоком рідини, є мірою відношення товщини примежового шару δ і визначального геометричного розміру l .

До критерію Нусельта входить визначальний коефіцієнт тепловіддачі a .

Після перетворення рівняння (5.6) має такий вигляд:

$$\frac{t}{\tau} + \frac{t}{l} w = \frac{a t}{l^2}. \quad (5.13)$$

Розділимо послідовно кожен член лівої частини рівняння на праву. Після поділу $\frac{t}{\tau}$ на $\frac{a t}{l^2}$ отримаємо:

$$\frac{t}{\tau} : \frac{a t}{l^2} = l^2 / a \tau.$$

Замінімо величину $l^2 / a \tau$ оберненою величиною і отримаємо критерій Фур'є:

$$F_0 = \frac{a \tau}{l^2}.$$

Критерій Фур'є – обов'язкова умова подібності несталого процесу теплообміну, він є аналогом критерію гомохронності H_0 за гідродинамічної подібності.

Розділимо $\frac{t}{l} w$ на $\frac{a t}{l^2}$, отримаємо:

$$\frac{t w}{l} : \frac{a t}{l^2} = \frac{w l}{a}.$$

Величина $w l / a$ називається критерієм Пекле:

$$\frac{w l}{a} \equiv Pe.$$

Критерій Пекле є мірою відношення між теплом, яке переноситься шляхом конвекції і теплопровідності за конвективного теплообміну.

Критерій Пекле можна представити як добуток двох безрозмірних комплексів:

$$Pe = \frac{wl}{v} \cdot \frac{v}{a} = \frac{wl\rho}{\mu} \cdot \frac{\mu c}{\lambda} = Re \cdot Pr,$$

де $v = \frac{\mu}{\rho}$, μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, або в'язкість, Н·с/м²; v – кінематичний коефіцієнт в'язкості, м²/с; $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·с).

Критерій Прандтля складається із величин, які виражають фізичні властивості рідини, характеризує подібність фізичних властивостей теплоносіїв за конвективного теплообміну, і є мірою подібності температур і швидкостей.

Обов'язковими умовами подібності процесів теплообміну є також відповідність гідродинамічної і геометричної подібності. До першої належить рівність критеріїв H_0, Re , і F_r , до другої – постійність відношень геометричних розмірів стінки $l_1, l_2, \dots, l_n$ до деякого характерного розміру (діаметра, довжини труби, радіуса кривизни і т.п.).

Таким чином, критеріальне рівняння конвективного теплообміну можна записати у вигляді:

$$f\left(F_0, Nu, Pr, H_0, Re, Fr, \frac{l_1}{l_0}, \frac{l_2}{l_0}, \dots, \frac{l_n}{l_0}\right) = 0. \quad (5.14)$$

Зважаючи на те, що критерій Нусельта є визначальним, залежність (5.14) перепишемо у вигляді:

$$Nu = f\left(F_0, Pr, H_0, Re, Fr, \frac{l_1}{l_0}, \frac{l_2}{l_0}, \dots, \frac{l_n}{l_0}\right). \quad (5.15)$$

За сталого процесу теплообміну із узагальненого рівняння (5.15) вилучають критерії F_0 і H_0 .

За тепловіддачі в умовах природної конвекції до визначальних критеріїв належить критерій Фруда, який відображає відношення сил тяжіння в подібних системах $\left(F_r = \frac{w^2}{gl}\right)$. Однак з огляду на труднощі визначення швидкості в умовах природної конвекції критерій Фруда змінюють на похідний критерій Архімеда:

$$Ar = \frac{gl^3}{v^2} \cdot \frac{\rho - \rho_0}{\rho}, \quad (5.16)$$

де ρ і ρ_0 – густина холодної і нагрітої рідини.

Критерій Архімеда характеризує відношення рівнодійної сил тяжіння і піднімальної сили, яка діє на частинки, до піднімальної сили. Різниця густин в різних точках рідини залежить від різниці температур в цих точках Δt . Отже, $\frac{\rho - \rho_0}{\rho}$ можна представити добутком $\beta \Delta t$, де β – температурний коефіцієнт об'ємного розширення рідини.

Замінімо значення $(\rho - \rho_0)/\rho$ в критерії Архімеда на $\beta \Delta t$ і отримаємо критерій Грасгофа:

$$Gr = \frac{gl^3 \beta \Delta t}{v^2}, \quad (5.17)$$

де β – коефіцієнт об'ємного розширення рідини, 1/град; Δt – різниця температур між стінкою і рідиною, в якій визначають різницю тисків, град; l – характерний геометричний розмір (для труби – діаметр, для вертикальної стінки – висота); v – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с.

Таким чином, критерій Грасгофа, подібно до критерію Архімеда, є аналогом критерію Фруда. Критерій Грасгофа являє собою визначальний критерій теплової подібності за умови природної конвекції, коли рух рідини цілком зумовлений процесом теплообміну, який можна розглядати як міру відношення сил тертя до піднімальної сили, котра визначається різницею тисків (густин) в різних точках неізотермічного потоку.

Під час вимушеного руху, коли вплив сил тяжіння на гідродинаміку потоку нехтовно малий, впливом критерію Фруда на процес теплообміну нехтують ($F_r = 0$), тобто:

$$N_u = 1 \left(P_r, R_e, \frac{l_1}{l_0}, \frac{l_2}{l_0} \dots \frac{l_n}{l_0} \right). \quad (5.18)$$

Вигляд цієї функції визначають дослідним шляхом, причому їй надають степеневу залежність. У разі руху потоку в трубі діаметром d і довжиною l залежність (5.18) представляють у вигляді:

$$N_u = \frac{al}{\lambda} C R_e^m P_r^n \left(\frac{l}{d} \right)^p, \quad (5.19)$$

де C, m, n, p – величини, які визначають за результатами дослідів.

У результаті експериментів визначають критерії подібності і з критерію Нусельта знаходять коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha = \frac{N_u \cdot \lambda}{l}.$$

Передавання тепла шляхом випромінювання

Теплообмін шляхом випромінювання – процес передавання тепла у вигляді електромагнітних хвиль у просторі зі швидкістю світла. Зустрічаючи на своєму шляху тверді, рідкі та газоподібні матеріали, теплові промені частково поглинаються, відбиваються або проходять крізь матеріал. Поглинуті промені перетворюються в теплову енергію.

Загальну кількість теплової енергії, яка випромінюється поверхнею F за одиницю часу, називають променевим тепловим потоком Q . Величину цього потоку, віднесену до одиниці поверхні, називають поверхневою щільністю променевого теплового потоку, або випромінювальною здатністю $E = Q/F$.

Кількість тепла, яка передається випромінюванням, можна визначити за формулою:

$$Q = a_e \Delta t, \quad (5.21)$$

де a_e – коефіцієнт теплообміну під час випромінювання, який можна визначити за рівнянням:

$$a_e = \varepsilon_n C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] / (T_1 - T_2),$$

де ε_n – приведена ступінь чорноти матеріалів, які випромінюють і поглинають тепло; C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; T_1 і T_2 – абсолютна температура тіл.

Теплообмін шляхом випромінювання відбувається в печах випалу цементного клінкеру, вапна, керамічних виробів і пористих заповнювачів, в котельних установках, під час сушіння захисних покриттів арматурних каркасів, полімеризації водозахисних покриттів будівельних конструкцій, теплової обробки бетонів тощо.

5.2. Рушійна сила теплових процесів

Як відомо, рушійною силою є різниця потенціалів, яка характеризує віддаленість системи від рівноваги.

Ця різниця ($\Delta t = t_1 - t_2$) називається температурним напором.

У процесі теплообміну температура середовища змінюються, і, як наслідок, змінюється і величина Δt , яка залежить від направленості потоків.

Характер змін температури теплоносія залежить від організації його руху (рис. 5.2). За прямоточного руху теплоносії охолоджується від температури t'_1 до t''_2 , а матеріал нагрівається від t'_2 до t''_2 . За проточної температура теплоносія є однаковою, а t'_2 матеріалу не може бути більшою від t'_1 .

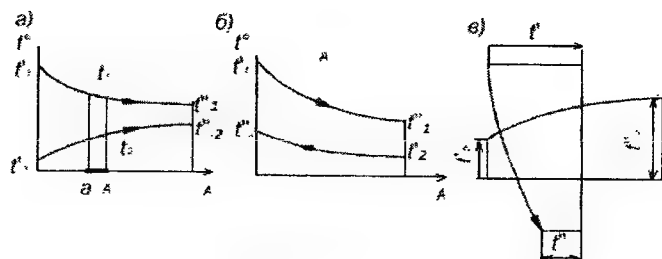


Рис. 5.2. Характер змін температур теплоносія і матеріалу залежно від напрямленості потоків:

а – за прототечії; *б* – за протитечії; *в* – перехресного потоку

За протитечії можливий випадок, коли $t_2'' > t_1''$. Це означає, що середній температурний напір Δt у разі протитечії є більшим і на поверхні теплообміну відбувається більш рівномірне розподілення. Але з погляду витрат енергії прототечія вигідніша, ніж протитечія.

У промисловості будівельних матеріалів протитечію застосовують значно частіше, ніж прототечію з таких причин: більшість матеріалів мають незначну міцність і не витримують великих перепадів температури; середня різниця температур більша, ніж за прототоку, і більша швидкість теплообміну. Тобто час на обробку матеріалу за протитечії менший, ніж за прототоку. Тому вирішальним у виробництві схеми подачі теплоносія є якість продукції, кількість браку від перегріву. В деяких випадках застосовують перехресний потік.

5.3. Суть процесів сушіння

Сушінням називають процес видалення вологи з матеріалу. Для цього потрібно і достатньо, щоб парціальний тиск водяної пари на поверхні матеріалу був більшим, ніж парціальний тиск водяної пари в навколишньому середовищі.

Для підвищення економічної ефективності і швидкості процесу теплоносії підігрівають, внаслідок чого його відносна вологість зменшується і набуває більшої асиміляційної здатності до вологи.

Завдяки використанню нагрітого теплоносія процес відбирання вологи від матеріалу супроводжується більш інтенсивною передачею тепла.

Сушіння матеріалів може відбуватися в *природних і штучних умовах*. Природне сушіння характеризується значною тривалістю і є економічно не вигідним, тому в промисловості будівельних матеріалів має обмежене значення.

Штучне сушіння виконують в спеціальних установках – сушарках, в які надходить вологий матеріал і теплоносії. Теплоносії відбирає вологу від матеріалу і потім примусово виводиться із сушарки. Замість нього в апарат подають наступну порцію теплоносія.

Процес сушіння є не тільки теплотехнічним, а й насамперед технологічним процесом. Режим сушіння визначається властивостями матеріалу і закономірностями їх зміни в процесі виведення вологи і дії тепла.

Властивості матеріалу значною мірою залежать від кількості і форми зв'язку вологи з сухою речовиною матеріалу.

Для видалення вологи з матеріалу потрібно порушити зв'язок із сухою речовиною, тобто витратити на це деяку енергію.

Енергетична класифікація форм зв'язку вологи з матеріалом (запропонована П.А. Ребіндером) є загальновизнаною.

Згідно з цією класифікацією розрізняють в порядку зменшення витрат енергії на сушіння три форми зв'язку вологи з матеріалом: хімічну, фізико-хімічну і фізико-механічну.

Хімічно зв'язана волога входить в склад кристалогідратів, до неї належить також молекулярно зв'язана волога. Ця волога під час сушіння не видаляється.

Фізико-хімічний зв'язок утримує в матеріалі адсорбційну, структурну й осмотично зв'язану вологу.

Матеріали залежно від форми зв'язку вологи поділяють на капілярно-пористі, колоїдні і колоїдно-капілярно-пористі.

У *капілярно-пористих матеріалах* волога утримується силами капілярного тиску, в процесі сушіння ці матеріали не зазнають суттєвої зміни розмірів і об'єму.

У колоїдних матеріалах переважає осмотично або структурно зв'язана волога. У процесі вилучення вологи ці матеріали зазнають значної усадки без зміни еластичних властивостей.

У колоїдно-капілярно-пористих матеріалах стінки капілярів еластичні, внаслідок поглинання вологи вони збільшуються в об'ємі.

5.4. Вологий стан матеріалу під час сушіння

У процесі сушіння вилучають тільки фізико-хімічно і фізико-механічно зв'язану з матеріалом вологу. Вологий матеріал розглядають як систему, яка складається з абсолютно сухого матеріалу (з хімічно зв'язаною вологою) і води, тобто

$$M_{\text{вол}} = M_{\text{абс-с}} + W, \quad (5.22)$$

де $M_{\text{вол}}$ – маса вологого матеріалу; $M_{\text{абс-с}}$ – маса абсолютно сухого матеріалу; W – маса фізико-хімічно і фізико-механічно зв'язаної вологи.

Розрізняють три стани матеріалів відносно навколишнього середовища: *вологий*, у якому матеріал віддає вологу навколишньому середовищу; *рівноважний*, коли вологообміну між матеріалом і середовищем немає; *гігроскопічний*, у якому матеріал поглинає вологу із навколишнього середовища.

Для дослідження вологого стану матеріалу його ставлять в камеру із заданою температурою і відносною вологістю. Після досягнення рівноважного стану визначають вологовміст матеріалу. За зміни температури і вологовмісту середовища отримують ряд точок, за якими будують криві сорбції вологого матеріалу. Ці криві характеризують рівноважну вологість матеріалу в координатах U_p і $\varphi\%$ за певних, цілком визначених температури і тиску.

Ізотерми сорбції для температур t_1 , t_2 і t_3 за умови $t_1 < t_2 < t_3$ зображено на рис. 5.3. Очевидно, що в міру збільшення температури рівноважна вологість матеріалу зменшується.

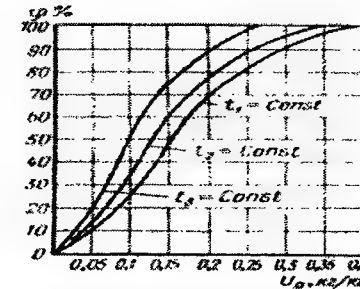


Рис. 5.3. Ізотерми сорбції (десорбції) вологого матеріалу

З практичною метою ізотерми сорбції використовують для визначення кінцевої вологості матеріалу, до якої потрібно доводити процес сушіння.

Якщо на вологий матеріал діяти нагрітим повітрям або газом, то волога з його поверхні буде випаровуватися. Зсередини об'єму матеріалу почнеться рух вологи до поверхні випаровування.

Графічну залежність зміни вологовмісту матеріалу в часі в процесі сушіння називають *кривою сушіння*.

Для більшості будівельних матеріалів криві сушіння мають аналогічний характер. Така характеристика кривої сушіння для постійного температурного режиму наведена на рис. 5.4.

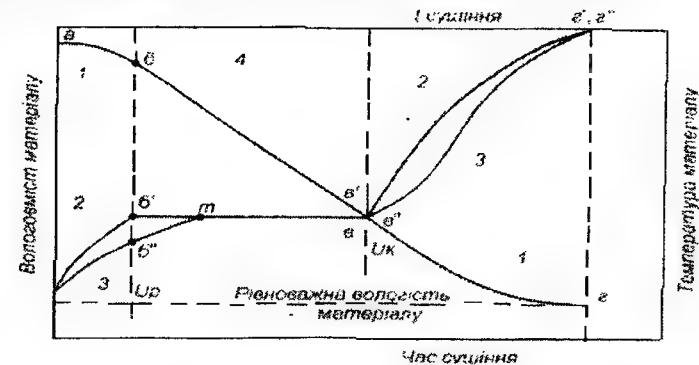


Рис. 5.4. Зміна вологовмісту і температури матеріалу в процесі сушіння

У початковий період сушіння (рис. 5.4, крива 1 від точки *a* до точки *b*) зменшення вологовмісту відбувається повільно; в цей час температура матеріалу підвищується (криві 2 і 3). Цей період називають *періодом нагрівання*, крива 2 відображає температуру поверхні, а крива 3 – температуру центральної частини матеріалу. Вологовміст матеріалу після періоду нагрівання зменшується за лінійним законом від точки *b* до точки *в* (крива 1), його зменшення за одиницю часу є постійною величиною.

Температура поверхні в цьому інтервалі, залишаючись постійною, дорівнює температурі адиабатичного насичення повітря – температурі мокрого термометра. В той самий час температура в центральній частині матеріалу далі підвищується і досягає температури мокрого термометра пізніше (точка *т*, крива 3).

Перепад температур від точки *т* між температурою теплоносія і матеріалом до точки *b* (*b'*, *b''*) буде постійним, тобто все тепло, яке передається від теплоносія до матеріалу, витрачається на випаровування вологи.

Цей період називається періодом *постійної швидкості сушіння*.

Від точки *b* прямолінійна ділянка кривої сушіння переходить в криволінійну, кількість відбираної вологи за одиницю часу зменшується. В той самий час температура починає підвищуватись, причому температура центральної частини відстає від температури поверхні матеріалу.

Усередині матеріалу виникає різниця температур, яка зменшується в міру наближення до рівноважної вологості матеріалу і теплоносія, і криві 2 і 3 досягають температури сушіння (крива 4).

Цей період називається періодом *спадної швидкості сушіння*. Вологовміст матеріалу в момент переходу до періоду спадної швидкості сушіння називають *критичним* U_k .

Криві сушіння недостатньо повно характеризують динаміку процесу, тому для більш якісного аналізу будують графічні залежності між швидкістю сушіння і вологовмістом матеріалу. Таку залежність виявляють, застосувавши метод диференціювання кривої сушіння (рис. 5.5).

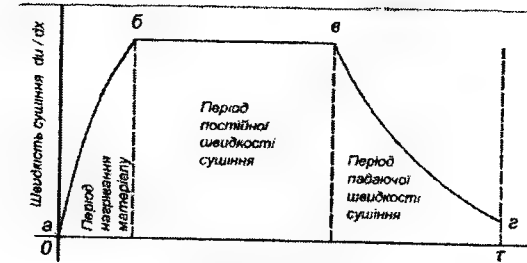


Рис. 5.5. Крива швидкості сушіння

Після розміщення матеріалу в сушарці температура в перший період збільшується по кривій *аб*. На ділянці *бв* відбувається процес сушіння з постійною швидкістю. В точці *в* швидкість сушіння починає знижуватися (період спадної швидкості) до точки *г*, процес сушіння закінчується, і матеріал досягає рівноважної вологості з теплоносієм.

5.5. Класифікація установок для теплової обробки

Для передавання тепла від одного середовища до іншого застосовують теплообмінні апарати. За принципом роботи апарати поділяють на *змішувальні* і *рекуперативні* (рис. 5.6).

Тепловіддача в *змішувальних апаратах* відбувається безпосередньо під час стикання і змішування теплоносія з навколишнім середовищем. До таких апаратів належать *градирні, конденсатори, кондиціонери*, в яких відбувається нагрівання або охолодження води або повітря.

Більшість теплових апаратів, які застосовують у технології будівельних матеріалів для сушіння і випалювання, належать до *змішувальних апаратів*. Середовищем, яке в них нагрівається, є твердий матеріал (садка керамічних відформованих виробів, цементний клінкер, різні види пористих заповнювачів, вапняки тощо).

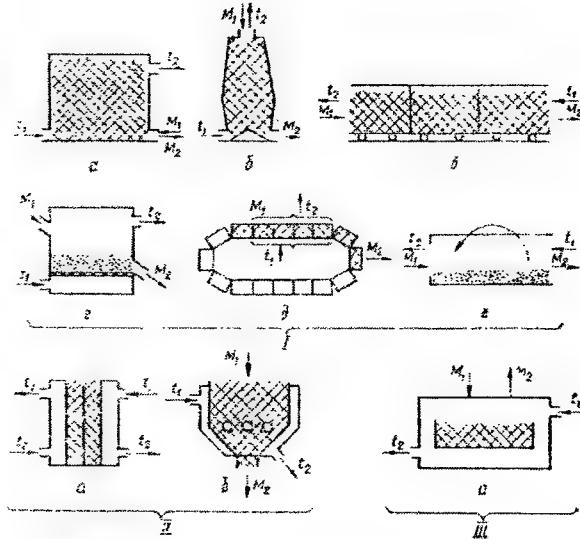


Рис. 5.6. Схеми теплових апаратів у технології будівельних матеріалів:

I – змішувальні апарати:

а – камерна піч, сушарка; б – шахтна піч; в – тунельна піч, сушарка;

г – сушарка, піч з киплячим шаром; д – спікальна решітка;

е – обертова піч, сушарка; II – рекуперативні апарати: а – касетна установка для тепловологої обробки бетонних виробів; б – бункер для підігрівання заповнювачів; III – апарат змішаної дії – пропарювальна камера

У рекуперативних апаратах тепло від теплоносія передається через розділювальну стінку. До них належать парові котли, нагрівальні прилади, варильні котли для отримання будівельного гіпсу і плавлення бітумів, касетні установки тощо.

Для виготовлення бетонних і залізобетонних виробів застосовують теплові установки, в яких тепло до матеріалу передається як безпосередньо, так і через розділювальну стінку. Таке змішане підведення тепла застосовують для обробки виробів в ямних і тунельних пропарювальних камерах і автоклавах. В такому разі виріб нагрівається як з відкритої поверхні, яка контактує з паром, так і крізь металеві стінки форми.

1. Назвіть способи передавання теплової енергії.
2. Що собою являє тепловий потік, температурний градієнт, теплове поле і рушійна сила теплових процесів?
3. У чому полягає фізичний зміст закону Фур'є?
4. Як скласти диференціальне рівняння теплопровідності?
5. Як можна визначити коефіцієнт тепловіддачі?
6. Що є рушійною силою теплових процесів?
7. Як отримати диференціальне рівняння конвективного теплообміну?
8. Назвіть критерії теплової подібності і наведіть критеріальне рівняння конвективного теплообміну.
9. За якими ознаками класифікують теплообмінні апарати?
10. У чому суть рівнянь теплового балансу і теплопередачі?

Розділ VI. ОСНОВИ МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ

Процеси масообміну в системах, які складаються з двох і більше фаз, характеризуються перенесенням речовини з однієї фази в іншу: з рідкої в газоподібну, із твердої в рідку або газоподібну, із однієї рідкої в іншу рідку.

Масообмінні процеси поділяють на чотири підкласи: *тепломасообмінні*, до яких належать плавлення, кристалізація, сушіння, сублімація, дистиляція, розчинення, зволоження, набухання; *сорбційні процеси* – адсорбція, абсорбція, десорбція; *екстракційні процеси* – екстрагування твердих речовин, екстрагування із рідин; *електродифузійні процеси* – діаліз, електрофорез.

Перенесення речовин з об'єму однієї фази в об'єм іншої крізь поверхню розподілу фаз називають *масопередачею*, а перенесення речовини в об'ємі фази до поверхні розподілу або від неї – *масовіддачею*.

Перенесення речовини із однієї фази в іншу відбувається шляхом молекулярної і конвективної дифузії, тому ці процеси називають також дифузійними процесами. Фазу, з якої речовина виходить, називають фазою, яка віддає Φ_v , а фазу, в яку переходить речовина, – фазою, яка приймає Φ_n .

У нерівноважних системах процеси масоперенесення виникають самовільно і відбуваються в напрямку від більших концентрацій до менших, наближаючись до динамічної фазової рівноваги, тобто до рівномірного розподілу речовини в усьому об'ємі.

Рушійною силою масообміну є різниця концентрацій між фактичною і рівноважною, за якої процес припиняється.

Звичайно кількісний склад фаз виражають по-різному, зокрема концентрацією будь-якого i -компонента в стичних фазах в масових відсотках ($q_i, \%$) або в частках маси ($q_i, \text{кг/кг}$), які показують частину загальної маси $\sum q$ фази, становить маса цього q_i компонента, а також мольними частками – відношенням кількості молей m_j компонента до суми молей компонентів суміші.

Склад газових сумішей інколи виражають через парціальний тиск компонентів, пропорційний концентрації компонентів і не залежний від температури газів. Співвідношення між тиском компонента і його концентрацією визначають згідно із законом Генрі (парціальний тиск P_A розчиненого газу пропорційний його мольній частці X_A в розчині):

$$P_A = EX_A, \quad (6.1)$$

де P_A – парціальний тиск газу, який поглинається і перебуває в рівновазі з розчином, що має концентрацію X_A ; X_A – концентрація газу в розчині, рівноважна з газовою фазою, в якій парціальний тиск компонента, що поглинається, дорівнює P_A ; E – коефіцієнт (константа) Генрі.

На кінетику масоперенесення впливає природа фаз, їх агрегатний стан, взаємне переміщення і перемішування. Основою рівноваги є відоме правило фаз Гіббса:

$$\Phi + C = K + 2,$$

де Φ – кількість фаз; C – кількість ступенів свободи, тобто кількість незалежних змінних, які можна довільно змінювати, не порушуючи кількості фаз в системі; K – кількість компонентів системи.

6.1. Основні закони масообмінних процесів

Швидкість масопередачі пов'язана з механізмом перенесення розподілюваної речовини у фазах, між якими відбувається масообмін. Перенесення маси речовини всередині однієї фази або з об'єму фази, яка віддає, до поверхні розподілу і навпаки, називається масовіддачею і може здійснюватися шляхом молекулярної дифузії, конвекції або їх одночасної дії.

Молекулярна дифузія

Молекулярною дифузією називається перенесення речовини, зумовлене хаотичним тепловим рухом молекул, атомів, іонів, колоїдних частинок за ламінарного руху. Процес зумовлений градієнтом концентрації в розглядуваному об'ємі.

Кількість дифундуваної речовини визначається першим законом Фіка, який за структурою аналогічний закону Фур'є:

$$dM = -D \cdot dF \cdot d\tau \frac{dc}{dx}, \quad (6.2)$$

де D – коефіцієнт молекулярної дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$; M – кількість речовини, що дифундує, кг ; $\frac{dc}{dx}$ – градієнт концентрації речовини, що дифундує, $\text{кг}/\text{м}^4$; F – площа, нормальна напрямку дифузії, м^2 ; τ – тривалість процесу, с .

Фізичний зміст коефіцієнта дифузії D – це кількість речовини, що дифундує за одиницю часу через одиницю поверхні за градієнта концентрації, який дорівнює одиниці:

$$D = dm \cdot dF \cdot d\tau \cdot dx/dc. \quad (6.3)$$

Коефіцієнт молекулярної дифузії являє собою фізичну константу, яка характеризує здатність речовини проникати внаслідок дифузії в нерухоме середовище.

Значення коефіцієнта D залежить від властивостей середовища і розподіленої речовини, температури і тиску і не залежить від гідродинамічних умов. Слід зазначити, що коефіцієнт дифузії є аналогом коефіцієнта температуропровідності.

Аналогічно диференціальному рівнянню теплопровідності (5.2) можна записати диференціальне рівняння молекулярної дифузії в нерухомому середовищі, яке називається *другим законом Фіка*:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = -D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right), \quad (6.4)$$

або

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = -D \nabla^2 C. \quad (6.5)$$

Конвективна дифузія

Конвективна дифузія – це перенесення речовини з одного середовища в інше в потоці рідини (газу), рух якого збігається із загальним напрямком потоку внаслідок теплового хаотичного руху мікрочастинок речовини (атомів, молекул, іонів).

Потік речовини від поверхні розподілу фаз або навпаки визначається законом М. Шукарева (аналогічного закону Ньютона для тепловіддачі). Згідно з цим законом потік речовини на межі розподілу фаз прямо пропорційний поверхні їх контакту, різниці концентрацій на межі розподілу фаз і в ядрі потоку, а також часу процесу:

$$dm = \beta_m (C_{\text{я}} - C_{\text{р}}) dF d\tau, \quad (6.6)$$

або

$$M = \beta_m (C_{\text{я}} - C_{\text{р}}) F \tau,$$

де β_m – коефіцієнт масовіддачі, який характеризує перенесення речовини одночасно шляхом дифузії і конвекції, м/с; $C_{\text{я}}$ і $C_{\text{р}}$ – концентрація речовини у ядрі потоку матеріалу, що віддає речовину, і концентрація речовини біля поверхні розподілу фаз, кг/кг.

Питомий потік речовини називають також швидкістю молекулярної дифузії.

Закон розподілення концентрації матеріалу в рухомому середовищі можна описати диференціальним рівнянням конвективного перенесення маси (аналогічно до конвективного перенесення тепла) у вигляді:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial \tau} + \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} w_x + \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} w_y + \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} w_z = D \left(\frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial z^2} \right), \quad (6.8)$$

або

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial \tau} + w \text{grad} \bar{c} = D \nabla^2 \bar{c}. \quad (6.9)$$

Основи масопередачі

Масопередача, як і тепlopередача, є складним процесом, що охоплює процес перенесення маси речовини спочатку в межах першої фази до межі розподілу, потім перенесення її крізь поверхню розділу фаз і, нарешті, перенесення речовини у межах другої фази (рис. 6.1).

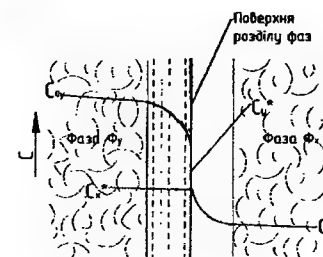


Рис. 6.1. Схема масообміну між фазами

Якщо під час теплопередачі середовища обмінюються теплом крізь стінку, то під час масопередачі обмін речовиною між фазами відбувається крізь межу розподілу фаз, що стикаються. При цьому межа може бути рухомою (у системах «газ – рідина», «пар – рідина», «рідина – рідина») або нерухомою (у системах з твердою фазою).

Масопередача характеризується основним рівнянням:

$$dm = K_m \Delta C dF d\tau, \quad (6.10)$$

де dm – кількість речовини, що дифундує, кг; ΔC – середня різниця концентрацій речовини у різних фазах, кг/кг; K_m – коефіцієнт масопередачі, м/с.

Процес перенесення речовини твердих матеріалів відбувається тільки шляхом молекулярної дифузії. Масоперенесення у твердих тілах називають також «стисненою» дифузією. Це «стиснення» пояснюється тим, що основа (каркас) матеріалу чинить опір дифузійному потоку. За аналогією з теплопровідністю замість поняття «стисненої» дифузії використовують поняття масопровідності.

Закон масопровідності має вигляд:

$$dm = -D_m dF d\tau \frac{dc}{dx}, \quad (6.11)$$

де D_m – коефіцієнт масопровідності, м²/с.

Залежність (6.11) – це аналог першого закону Фіка, а коефіцієнти молекулярної дифузії і масопровідності є тотожними.

6.2. Критерії подібності масообміну. Критеріальне рівняння конвективного масоперенесення

Отримані диференціальні рівняння (6.6) і (6.9) застосовують для розрахунку основної задачі конвективного масообміну – визначення коефіцієнта масовіддачі β_m . Цей коефіцієнт є не фізичною константою, а кінематичною характеристикою, яка залежить від властивостей фази (густини, в'язкості тощо) і гідродинамічних умов, а також геометричних розмірів і форми апарата. Тому величина коефіцієнта β_m є функцією багатьох

змінних, що значно ускладнює розрахунки. Як й у випадку гідродинамічних і теплообмінних процесів, використовуємо апарат теорії подібності для визначення критеріїв подібності і критеріального рівняння масовіддачі. Критерії подібності мають ті самі назви, що й критерії теплопередачі, але до них додають слово «дифузійний».

Дифузійний критерій Нусельта:

$$Nu_d = \beta_m \frac{l}{D_m}, \quad (6.12)$$

де l – характерний лінійний розмір; D_m – коефіцієнт молекулярної дифузії; β_m – коефіцієнт масовіддачі.

Критерій Nu_d характеризує процес масовіддачі біля поверхні розділення фаз.

Дифузійний критерій Фур'є:

$$F_{ол} = \frac{D\tau}{l^2}.$$

Критерій $F_{ол}$ характеризує зміну швидкості потоку речовини в часі і визначає необхідні умови подібності несталою режиму масовіддачі.

Дифузійний критерій Пеклє:

$$P_{ел} = \frac{wl}{D}.$$

Критерій Пеклє характеризує міру відношення маси речовини, яка переноситься шляхом конвекції і молекулярної дифузії.

Дифузійний критерій Прандтля характеризує подібність фізичних властивостей середовища. Він має вигляд:

$$P_{гд} = \frac{\nu}{D},$$

де ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості середовища.

За $P_{гд} = 1$ товщина дифузійного підшару дорівнює товщині гідродинамічного ламінарного підшару.

До умов подібності процесів масообміну потрібно віднести критерії Фруда і Рейнольдса.

В умовах природної конвекції критерій Рейнольдса замінюють на критерій Грасгофа (Gr), до якого належить швидкість.

У загальному вигляді критеріальне рівняння конвективного масообміну має такий вигляд:

$$f = \left(Re, Gr, Nu_d, P_{r_d}, F_{od}, \frac{L_1}{L_0} \right) = 0. \quad (6.13)$$

Виходячи із залежності (6.13) загальну функціональну залежність визначального критерію Нусельта Nu_d представляють у вигляді:

$$Nu_d = f \left(Re, P_{r_d}, Gr, \frac{L_1}{L_0} \right). \quad (6.14)$$

За вимушеного руху фази природна конвекція дуже мала; з рівняння (6.15) вилучаємо критерій Грасгофа, залежність матиме вигляд:

$$Nu_D = f \left(Re, P_r, \frac{L_1}{L_0} \right). \quad (6.16)$$

В умовах природної конвекції з рівняння (6.16) вилучаємо критерій Рейнольдса:

$$Nu_d = f \left(G_r, P_{r_d}, \frac{L_1}{L_0} \right), \quad (6.17)$$

або

$$Nu_d = AG_r^n P_{r_d}^m \Gamma^P. \quad (6.18)$$

Після підрахунку критерію Нусельта визначаємо коефіцієнт масовіддачі:

$$\beta = Nu_d \frac{D}{l}. \quad (6.19)$$

6.3. Рівняння масопередачі

Процес масопередачі охоплює процеси масовіддачі в межах кожної з двох взаємодійних фаз й одночасно процес перенесення розподілюваної речовини крізь поверхню розподілу фаз. Складність розрахунків процесу пов'язана з тим, що практично неможливо

визначити концентрації фаз безпосередньо на межі поділу. Зважаючи на це, основне рівняння масопередачі записують так:

$$M = K_y F (y - y^*); \quad (6.20)$$

$$M = K_x F (x^* - x),$$

де y^* , x^* – рівноважні концентрації в цій фазі, які відповідають концентраціям розподілюваної речовини в основній масі другої фази; K_y, K_x – коефіцієнти масопередачі, визначені відповідно через концентрації фаз Φ_y і Φ_x .

За фізичним змістом коефіцієнти масопередачі відрізняються від коефіцієнтів масовіддачі, хоча вони мають однакові з ними одиниці виміру.

Концентрації фаз змінюються під час руху вздовж поверхні поділу, отже, змінюється рушійна сила масопередачі. З цієї причини в рівняння вводять величину середньої рушійної сили $\Delta C_{усер}$ або $\Delta C_{хсер}$, тоді рівняння (6.20) і набувають вигляду:

$$M = K_y F \Delta C_{уф}; \quad (6.21)$$

$$M = K_x F \Delta C_{хф}.$$

За допомогою рівняння (6.21) визначають поверхню контакту фаз і за нею розраховують основні розміри апарата. Для визначення площі F треба попередньо розрахувати коефіцієнт масопередачі K_y і K_x і середню рушійну силу. Величину M визначають з матеріального балансу або задають у розрахунках.

Середню різницю концентрацій визначають аналогічно визначенню середньої різниці температур. За $\Delta C_{п} / C_{к} < 2$ середня різниця концентрацій становить:

$$\Delta C_{ср} = \frac{\Delta C_{п} + \Delta C_{к}}{2}, \quad (6.22)$$

де $\Delta C_{п}, \Delta C_{к}$ – початкова і кінцева різниця концентрацій у фазах системи.

За лінійної залежності між рівноважною і робочою концентраціями рушійну силу процесу визначають як середню логарифмічну величину між початковим і кінцевим значеннями рушійної сили. Зокрема, для фази А (рис. 6.2):

$$\Delta C_{Am} = \frac{\Delta \bar{C}_{Ap} - \Delta \bar{C}_{Ak}}{2,31g \frac{\Delta \bar{C}_{Ap}}{\Delta \bar{C}_{Ak}}}, \quad (6.23)$$

де $\Delta \bar{C}_{Ap} = \bar{C}_{Арп} - \bar{C}_{Ap}$ – рушійна сила на початку контакту фаз;

$\Delta \bar{C}_{Ak} = \bar{C}_{Арк} - \bar{C}_{Ak}$ – рушійна сила наприкінці контакту фаз.

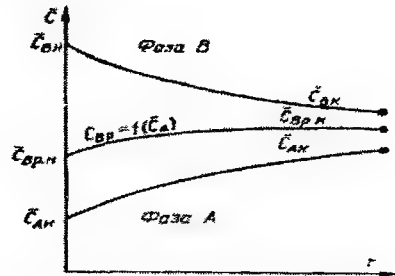


Рис. 6.2. Характер зміни робочої і рівноважної концентрації під час руху фаз вздовж поверхні контакту

Аналогічно для фази В:

$$\Delta \bar{C}_{Bm} = \frac{\Delta \bar{C}_{Bп} - \Delta \bar{C}_{Bк}}{2,31g \frac{\Delta \bar{C}_{Bп}}{\Delta \bar{C}_{Bк}}}, \quad (6.24)$$

де $\Delta \bar{C}_{Bп} = \bar{C}_{Bп} - \Delta \bar{C}_{Bрп}$ – рушійна сила на початку контакту фаз А і В;

$\Delta \bar{C}_{Bк} = \bar{C}_{Bп} - \bar{C}_{Bрк}$ – рушійна сила наприкінці контакту фаз.

6.4. Матеріальний баланс масопередачі і рівняння робочої лінії процесу

Процеси масопередачі здійснюються під час відносного руху взаємодійних фаз. За напрямком їх відносного руху розрізняють протітецію, протитецію, перехресний потік. Позначимо (рис. 6.3) масу, яка віддає, на початку процесу як $G_{п}$, а концентрацію в ній розподілюваної речовини – $\bar{C}_{гп}$; масу фази, яка приймає, – $L_{п}$, а концентрацію в ній розподілюваної речовини – $\bar{G}_{лп}$.

За протітеції фаз вздовж поверхні поділу відбувається процес масообміну. Якщо початкова концентрація розподілюваної речовини $\bar{C}_{гп}$ більша за рівноважну, то $\bar{C}_{бп}$ зменшується, а $\bar{G}_{лп}$ збільшується:

$$\bar{G}_g = -\frac{L}{G} \bar{C}_l + \frac{L \bar{C}_{лп} - \bar{C}_{п} \bar{C}_{гп}}{C_{п}}, \quad (6.25)$$

або

$$\bar{G}_g = A \bar{C}_l + B', \quad (6.26)$$

де $A' = \frac{L}{G}$ – питомі витрати однієї із розподілюваних фаз;

$B' = (L \bar{C}_{лп} - G_{п} \bar{C}_{бп}) / G_{п}$ – масова швидкість розподілюваної фази вздовж поверхні поділу.

Аналогічно для протітеції:

$$\bar{C}_g = A'' \bar{C}_l + B'' \quad (6.27)$$

Рівняння (6.26) і (6.27) є рівняннями прямих, які засвідчують, що концентрації розподілюваної речовини в розподілюваних фазах пов'язані лінійною залежністю, тому ці рівняння ще називають робочою лінією процесу. Процес масообміну можна представити графічно (рис. 6.3) у вигляді залежності між робочими концентраціями.

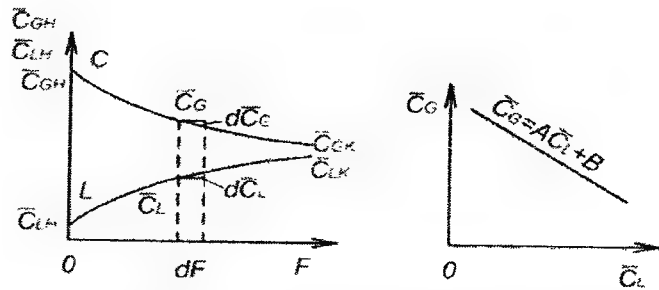


Рис. 6.3. Графік залежності між концентраціями фаз:
а – зміна концентрації розподіленої фази в площині по довжині поверхні масообміну; б – графік залежності між робочими концентраціями $\bar{C}_G$ і $\bar{C}_L$

6.5. Основні закономірності масоперенесення в капілярно-пористих матеріалах

Перенесення маси (вологи) в капілярно-пористих тілах відбувається неперервно внаслідок внутрішньої і зовнішньої дифузії.

Переміщення вологи всередині матеріалу називається масопровідністю, яка зумовлює не тільки швидкість теплообміну капілярно-пористого тіла з навколишнім середовищем, а й технічні властивості матеріалу.

Механізм та інтенсивність переміщення вологи всередині тіла залежить від форм зв'язку вологи з матеріалом, структури, температури, пористості та інших властивостей.

Аналогічно закону перенесення тепла основний закон перенесення вологи всередині матеріалу, згідно з дослідженнями А. Ликова, має вигляд:

$$g_m = -\lambda_m \nabla \theta, \quad (6.28)$$

де g_m – щільність потоку маси (вологи); λ_m – коефіцієнт масопровідності; $\nabla \theta$ – градієнт потенціалу перенесення маси (вологи), пропорційний градієнтам вологовмісту, температури і тиску.

Зважаючи на вплив цих градієнтів, загальний потік вологи можна представити як суму окремих потоків:

$$g_m = g_{mu} + g_{mt} + g_{mp}, \quad (6.29)$$

де g_{mu} , g_{mt} і g_{mp} – щільність потоку вологи, який рухається завдяки градієнту вологовмісту, температури і тиску відповідно.

У загальному вигляді закон внутрішнього масоперенесення в капілярно-пористих матеріалах можна виразити рівнянням:

$$g_m = -a_m \rho_0 \nabla U \pm a_m \rho_0 \delta_t \nabla t \pm a_m \rho_0 \delta_p \nabla P, \quad (6.30)$$

де a_m – коефіцієнт потенціалопровідності, який характеризує швидкість вирівнювання в об'ємі матеріалу; ρ_0 – середня густина матеріалу (сухого); δ_t і δ_p – коефіцієнти, які впливають на коефіцієнт a_m відношення зміни масоперенесення до перепаду температури і тиску; ∇U , ∇t і ∇P – градієнт вологовмісту, температури і тиску відповідно.

Перший член рівняння $a_m \rho_0 \nabla U$ виражає переміщення маси у вигляді рідини або пари під впливом градієнта вологовмісту ∇U . Знак мінус означає, що маса зменшується в напрямку її руху. Другий член рівняння $a_m \rho_0 \delta_t \nabla t$ виражає переміщення вологи під впливом температурного градієнта ∇t . Наявність ∇t по перерізу матеріалу змушує вологу переміщатися в напрямку теплового потоку. Третій член рівняння $a_m \nabla P$ виражає переміщення маси (вологи) в матеріалі завдяки градієнту надлишкового тиску ∇P .

Внутрішнє масоперенесення спостерігаємо за інтенсивного нагрівання вологого матеріалу, коли всередині його виникає надлишковий тиск пари. Градієнт надлишкового тиску пари має вирішальне значення у перенесенні маси в межах температур 60...100 °C і вище. При цьому відбувається не тільки молярне перенесення у рідині у вигляді пари, а й витіснення рідини по капілярах до поверхні матеріалу.

Зовнішній масообмін визначає умови взаємодії навколишнього середовища (пари, пароповітряної суміші, повітря, газів тощо) і матеріалу. Процес переміщення вологи з поверхні

матеріалу в середовище і навпаки виникає внаслідок різниці парціальних тисків водяної пари на поверхні $P_{\text{пм}}$ і середовища $P_{\text{ос}}$.

Зовнішнє перенесення маси можна описати законом Дальтона, який відображає зв'язок між фізичними параметрами, які впливають на швидкість процесу:

$$g_m = -a_m (P_{\text{пм}} - P_{\text{ос}}), \quad (6.31)$$

де a_m – коефіцієнт вологовіддачі [те саме значення, що й у рівнянні (6.6)]; $P_{\text{пм}}$ – парціальний тиск водяної пари над поверхнею матеріалу; $P_{\text{ос}}$ – парціальний тиск водяної пари в навколишньому середовищі; вираз $(P_{\text{пм}} - P_{\text{ос}})$ – аналогічний виразу в рівнянні (5.6).

За $P_{\text{пм}} > P_{\text{ос}}$ відбувається процес випаровування вологи, а за $P_{\text{ос}} > P_{\text{пм}}$ – процес конденсації.

6.6. Механізми тепло- і масообміну під час тепловологої обробки

З метою більш чіткого уявлення про поширення тепла і маси всередині матеріалу потрібно розглянути механізм цього процесу.

Основи тепловологої обробки

Тепловолога обробка відбувається тільки завдяки зовнішньому підведенню до матеріалу теплової енергії й одночасній дії вологи.

Тепловологу обробку застосовують у процесах виготовлення будівельних матеріалів і виробів, зокрема на основі мінеральних в'язучих, для запарювання деревини, переробки полімерних матеріалів.

Як теплоносії для тепловологої обробки застосовують водяну пару і гарячу воду.

Тепловологу обробку виконують в камерах, шнеках і формах за атмосферного тиску, а в автоклавах і герметичних формах – за підвищеного тиску.

Процес тепловологої обробки поділяють на три періоди:

- нагрівання матеріалу до температури теплоносія;
- витримування за максимальної температури;
- охолодження.

Після подачі пари в завантажений тепловий агрегат матеріал нагрівається. Цей період, який називають *періодом нагрівання*, закінчується, коли поверхня матеріалу нагрівається до температури теплоносія.

Другий період тепловологої обробки називають *періодом ізотермічної витримки* – тоді відбувається вирівнювання температурного поля матеріалу. Закінчення періоду визначається моментом досягнення температури в усьому об'ємі матеріалу, однакової з температурою теплоносія.

Третій період – *період охолодження матеріалу* – відбувається без витрат теплоносія, внаслідок чого настає охолодження.

Через те що перед пуском пари в теплову камеру в ній є повітря, обробку матеріалу виконують пароповітряною сумішшю.

Загальний тиск в тепловій камері P_3 під час тепловологої обробки без попереднього видалення повітря складається з парціального тиску пари $P_{\text{п}}$ і парціального тиску повітря $P_{\text{пв}}$:

$$P_3 = P_{\text{п}} + P_{\text{пв}}. \quad (6.32)$$

Під час обробки матеріалу пароповітряною сумішшю між теплоносієм і матеріалом відбувається складний процес тепло- і масообміну.

Пароповітряні суміші утворюються в пропарювальних камерах і автоклавах. Пара, яка надходить у теплові агрегати, змішується з повітрям, вміст якого в суміші становить 10...20%.

Експериментально з'ясовано, що наявність в парі незначної кількості повітря суттєво впливає на інтенсивність процесу теплової обробки. Зокрема, І. Волженський виявив, що наявність повітря в автоклаві знижує міцність бетонів на мінеральних в'язучих майже на 20%. Дослідники з'ясували також, що вміст 1% повітря в парі зменшує коефіцієнт тепловіддачі на 60%, а вміст 4...5% повітря – в 2...5 раз. Це пояснюється тим, що під час

конденсації пари біля поверхні теплообміну залишається шар повітря, який перешкоджає припливу пари до поверхні конденсації.

Дослідження, виконані І. Заседателевим, свідчать про те, що коефіцієнт тепловіддачі суттєво змінюється залежно від параметрів середовища.

Аналіз показав, що в разі збільшення кількості повітря коефіцієнт тепловіддачі різко зменшується. Температурний напір впливає на величину a тільки в початковий період. У міру збільшення вмісту повітря вплив Δt на a зменшується. В результаті були отримані рівняння зовнішнього теплообміну в початковий період нагрівання бетону. За значень відносної вологості $\varphi = 80 \dots 100\%$ рівняння в критеріальній формі має вигляд:

$$Nu = 14,3 R_e^{0,4} \left(\frac{t_m}{t_c} \right)^{3,8} \cdot K^{-0,36}, \quad (6.33)$$

де t_m – температура мокрого термометра середовища;
 t_m/t_c – параметричний критерій; K – критерій Кутателадзе,
 $K = r/C_k \Delta t$, де r – теплота конденсації; C_k – теплоємність конденсату; $\Delta t = (t_n - t_{ст})$, де t_n – температура пари;
 $t_{ст}$ – температура поверхні стінки.

Рівняння, яким описують нагрівання бетону в пароповітряному середовищі з відотною вологістю $\varphi = 30 \dots 60\%$, має вигляд:

$$Nu = 65 R_e^{0,4} \left(\frac{t_m}{t_c} \right)^{3,8}. \quad (6.34)$$

Нагрівання матеріалу в гарячій воді

Між рідиною і твердим матеріалом відбувається одночасний теплообмін шляхом теплопровідності і конвекції, який визначається градієнтом температури і коефіцієнтом теплопровідності.

Конвективне перенесення тепла залежить від руху рідини. Звичайно в басейнах і ваннах вимушений рух рідини не відбувається. Виникнення й інтенсивність руху визначається

тепловими процесами. Вони залежать від градієнта температури, а також від об'єму теплового апарата, в якому відбувається перенесення.

Щільність теплового потоку визначають за формулою Ньютона – Ріхтера (5.9):

$$g = a(t_p - t_{ст}). \quad (6.35)$$

Звичайно в басейнах і ваннах не відбувається вимушеного руху гарячої води, тому значення a за ламінарного режиму руху можна визначити за критеріальною залежністю:

$$Nu = 1,18(G_r, P_r)^{0,125}. \quad (6.36)$$

Нагрівання матеріалу пароповітряною сумішшю в теплових камерах

Для нагрівання в пароповітряному середовищі матеріал завантажують у пропарювальні камери. Підвищення температури починається з часу впускання пари до досягнення матеріалом температури теплоносія. Максимальна температура в пропарювальних камерах становить $80 \dots 85^\circ\text{C}$.

Після подачі в тепловий агрегат пара охолоджується на поверхні матеріалу. Залежно від стану поверхні відбувається її плівкова або краплинна конденсація. Плівкова конденсація характерна для поверхні, змоченої рідким конденсатом. За неповного змочування поверхні конденсатом відбувається краплинна конденсація, яка на практиці трапляється дуже рідко.

Конденсація пари можлива тільки на поверхні, яка має температуру, нижчу від температури насичення, за парціального тиску пари в суміші.

Разом з парою до поверхні конденсації надходить повітря, яке накопичується і зменшує на поверхні парціальний тиск пари за незмінного загального тиску суміші (рис. 6.4):

$$P_c = P'_п + P'_{пв} = P''_п + P''_{пв} \text{ за } P''_{пв} > P'_{пв}; P''_п < P'_п,$$

де $P'_п$ і $P'_{пв}$ – парціальний тиск пари і повітря в тепловій камері; $P''_п$; $P''_{пв}$ – парціальний тиск пари і повітря біля поверхні матеріалу.

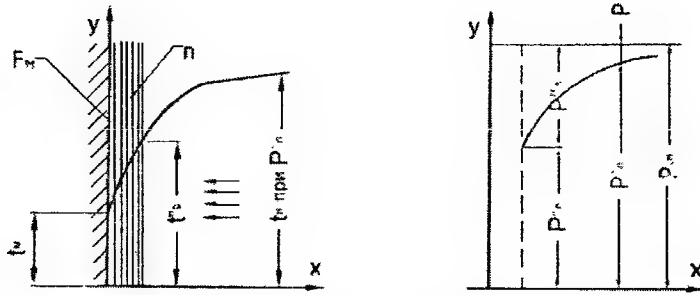


Рис. 6.4. Схема плівкової конденсації пароповітряної суміші на вертикальній поверхні матеріалу:

F_M – поверхня матеріалу; t_M – температура поверхні; П – плівка конденсату на поверхні; t_p'' – температура поверхні плівки; P_p' і $P_{пв}'$ – парціальний тиск пари і повітря в суміші; $P_{п}''$ і $P_{пв}''$ – парціальний тиск пари і повітря біля плівки на поверхні матеріалу

Відповідно до парціального тиску пари, яка конденсується на поверхні матеріалу $P_{п}''$, сторона плівки конденсату має температуру t_p'' і наближається до температури насичення за парціального тиску $P_{п}''$, $t_p'' \rightarrow t_n$.

Перенесення тепла крізь товщу шару рідкої плівки визначаємо за формулою:

$$q_T = \frac{\lambda}{\delta} (t_p'' - t_{пв}), \quad (6.37)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності водяної плівки; δ – товщина плівки конденсату; t_p'' – температура поверхні плівки конденсату; $t_{пв}$ – температура поверхні матеріалу.

Питомий потік перенесення пари до матеріалу визначають за формулою:

$$q_{п} = a_{п} \frac{M_{п}}{RT} (P_{п}' - P_{п}''), \quad (6.38)$$

де $a_{п}$ – коефіцієнт масовіддачі пари; M – маса пари; R – універсальна газова постійна.

Питомий тиск тепла дорівнює добутку потоку маси пари на теплоту пароутворення – r :

$$q_{Т,п} = \frac{r a_{п} M_{п}}{RT} (P_{п}' - P_{п}''). \quad (6.39)$$

Додаткове перенесення тепла до матеріалу внаслідок різниці температур сконденсованої плівки t_p'' і пароповітряної суміші $t_{см}$, яка заповнює теплову камеру ($t_{см} > t_p$) визначають за формулою:

$$q_{дт} = a_{п} (t_{пв} - t_p''), \quad (6.40)$$

де $q_{дт}$ – питомий потік тепла від пароповітряної суміші до плівки конденсату; $a_{п}$ – коефіцієнт тепловіддачі від пароповітряної суміші до поверхні плівки конденсату.

Сумарний потік тепла до матеріалу крізь товщу рідкої плівки дорівнює сумі питомих потоків тепла від плівки сконденсованої пари $q_{Т,п}$ і пароповітряної суміші $q_{Т,с}$:

$$q_T = q_{Т,п} + q_{Т,с}. \quad (6.41)$$

Підставивши значення q_T в рівняння (5.24), отримаємо:

$$\frac{\lambda}{\delta} (t_p'' - t_{пв}) = a_{п} \frac{r M_{п}}{RT} (P_{п}' - P_{п}'') + a_{пв} (t_{пв} - t_p''). \quad (6.42)$$

Ліва частина цього рівняння відображає тепловий потік, отримуваний матеріалом; права частина являє собою суму теплових потоків, утворюваних унаслідок конденсації пари і теплообміну з пароповітряною сумішшю.

У рівнянні (6.42) перший член правої частини визначає витрати тепла на випаровування води, другий – на нагрівання матеріалу. Якщо води в матеріалі немає, перший член правої частини дорівнює нулю і рівняння (6.42) набуває вигляду:

$$a_{см} (t_T - t_{пв}) = c \rho_0 R_v \frac{dt}{d\tau}. \quad (6.43)$$

У сушарках, в яких температура не перевищує 200 °С, для зовнішнього теплообміну можна використовувати рівняння Ньютона для конвективного теплообміну:

$$q = a (t_T - t_{пв}),$$

де a – коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія до поверхні матеріалу; t_{τ} – середня температура теплоносія; $t_{\text{пов}}$ – середня температура поверхні матеріалу.

Під час сушіння матеріалів за температури, вищої від 200 °С, значно зростає частка променевого теплообміну. Коефіцієнт тепловіддачі $a_{\text{см}}$ є сумою двох складових: променевого $a_{\text{п}}$ і конвективного $a_{\text{к}}$. Тепловий потік витрачається на нагрівання матеріалу і вологи.

Рівняння теплового балансу за зовнішнього теплообміну має такий вигляд:

$$a_{\text{см}}(t_{\tau} - t_{\text{п}}) = r\rho_0 \frac{dw}{d\tau} + c\rho_0 R_v \frac{dt}{d\tau}, \quad (6.44)$$

де r – теплота випаровування; ρ_0 – середня густина сухого матеріалу; R_v – відношення об'єму сухого матеріалу до поверхні, з якої відбувається його випаровування; $\frac{dw}{d\tau}$ – швидкість випаровування; c – питома теплоємність матеріалу; $\frac{dt}{d\tau}$ – швидкість нагрівання матеріалу.

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі $a_{\text{см}}$ рекомендується використовувати багато різних критеріальних рівнянь. Наприклад, О. Дмитрович в результаті експериментальних досліджень рекомендує критеріальне рівняння в такому вигляді:

$$N_u = C(P_r G_a K)^{0,25} \left(\frac{0,48}{1 + \epsilon_0^{0,3}} \right). \quad (6.45)$$

У рівнянні (6.45) коефіцієнт C залежить від орієнтації поверхні в просторі теплової камери (автоклава): для вертикальної поверхні $C = 0,52$; для верхньої горизонтальної поверхні $C = 0,38$; для нижньої горизонтальної поверхні $C = 0,3$.

Як визначальні критерії рівняння містить критерій Прандтля $P_r = \frac{v}{a}$; критерій Галілея $G_a \equiv \frac{qt^3}{\nu^2}$ і критерій Кутателадзе

$K = \frac{r}{c\Delta t}$; де r – теплота пароутворення; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості; q – теплове напруження поверхні теплообміну; l – визначальний розмір; c – теплоємність середовища; Δt – різниця температур пароповітряної суміші і поверхні матеріалу; ϵ_0 – вміст повітря в пароповітряній суміші ($\epsilon_0 = 0 \dots 9\%$ по об'єму); a – коефіцієнт тепловіддачі.

Внутрішній тепло- і масообмін

Під час теплової обробки перенесення тепла в матеріалі супроводжується перенесенням вологи і повітря, тому, як і в процесі сушіння, перенесення маси може бути відображене у вигляді рівняння:

$$q = -\lambda \Delta t + i q_m, \quad (6.46)$$

де q – щільність потоку тепла; λ – коефіцієнт теплопровідності вологого матеріалу; i – ентальпія вологи, яка переміщується в матеріалі; Δt – градієнт температури; q_m – щільність потоку вологи, який переміщується в матеріалі.

Перенесення маси всередині вологого матеріалу може відбуватися у вигляді рідини або пари в напрямку від більшого потенціалу до меншого. Щільність потоку вологи прямо пропорційна градієнту потенціалу масоперенесення:

$$q_m = -\lambda_m \nabla \theta, \quad (6.47)$$

де q_m – щільність потоку маси; λ_m – коефіцієнт масопровідності або коефіцієнт вологопровідності; $\nabla \theta$ – градієнт потенціалу перенесення маси.

Потенціал масоперенесення визначають за вологовмістом матеріалу еталона U_e , питому вологоємність якого вважають постійною і яка дорівнює 0,01 U_{Γ} (U_{Γ} – максимальний гігроскопічний вологовміст еталона при 25 °С):

$$\theta = \frac{U_e}{C'_{em}} = \left(\frac{U}{U_{\Gamma}} \right)_T \cdot 100. \quad (6.48)$$

Питоною C'_m називають вологоємкість одиниці маси матеріалу. *Вологоємкість матеріалу* – це добуток питомої вологоємкості C'_m на масу абсолютно сухого матеріалу M :

$$C_m = C'_m \cdot M = C'_m \rho_0 V_0, \quad (6.49)$$

де $C'_m \rho_0 = C_m / V_0$ – об'ємна вологоємкість матеріалу.

Поле потенціалу вологоперенесення θ може бути функцією трьох, двох і однієї координати.

За ізотермічних та ізобаричних умов (температура і тиск постійні в усіх точках матеріалу) потенціал масоперенесення θ є однозначною функцією вологовмісту U . У цьому випадку закон перенесення можна записати так:

$$\frac{\partial \theta}{\partial u} = \left(\frac{\partial \theta}{\partial u} \right)_{\text{тр}} \cdot \frac{\partial u}{\partial n}, \quad (6.50)$$

де $\frac{\partial \theta}{\partial n}$ – скалярна величина вектора $\nabla \theta$; n – нормаль до

ізопотенціальної поверхні; $\left(\frac{\partial \theta}{\partial u} \right)_{\text{тр}} = 1/C'_m$ – частинна похідна потенціалу переносу, яка дорівнює оберненій величині питомої вологоємкості $1/C'_m$. Тоді залежність між градієнтом потенціалу масоперенесення $\Delta \theta$ і градієнтом вологовмісту ΔU запишемо так:

$$\nabla \theta = \frac{1}{C'_m} \nabla U. \quad (6.51)$$

Підставимо значення $\nabla \theta$ в рівняння (6.47) і отримаємо значення для окремого потоку маси за рахунок ∇U (градієнта вологовмісту). Перемноживши і розділивши праву частину рівняння (6.47) на ρ_0 , отримуємо:

$$q_{mi} = -\frac{\lambda m}{c'_m \rho_0} \cdot \rho_0 \Delta U = -a_m \rho_0 \Delta U. \quad (6.52)$$

Отриманий коефіцієнт $\lambda m / C'_m \rho_0 = a_m$ за фізичним змістом є аналогом коефіцієнта температуропровідності $a = \lambda / C \rho_0$. За аналогією a_m називають *коефіцієнтом потенціалопровідності*.

Отже, a_m є величиною, яка характеризує швидкість вирівнювання вологовмісту в матеріалі внаслідок вирівнювання потенціалу масоперенесення.

Таким чином, рівняння (6.52) визначає частковий потік вологи в матеріалі q_{mi} , який виникає за наявності градієнта вологовмісту.

Сукупність значень температури в певний момент для усіх точок простору називається *температурним полем*. Усі точки простору, які мають однаковий потенціал вологоперенесення, утворюють ізопотенціальну поверхню. Зміна потенціалу вологоперенесення може відбуватися тільки в напрямку перетинання ізопотенціальної поверхні, наприклад, в напрямку X (рис. 6.5).

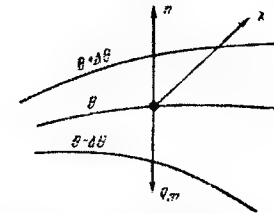


Рис. 6.5. До визначення градієнта потенціалу вологоперенесення і потоку маси

Найбільша зміна потенціалу вологоперенесення можлива в напрямку нормалі N до ізопотенціальної поверхні. Отже, частинна похідна потенціалу вологоперенесення по нормалі до ізопотенціальної поверхні є градієнтом потенціалу перенесення $\nabla \theta$ – векторної величини. Позитивним напрямом вважають напрям зростання потенціалу вологоперенесення. Наявність градієнта вологоперенесення спричиняє в матеріалі потік вологи q_m , направлений у бік зменшення потенціалу вологоперенесення.

Потік вологи, віднесений до одиниці поверхні матеріалу, називають поверхневою щільністю потоку (щільністю потоку маси).

Згідно із законом Дарсі фільтраційний потік q_m вологого повітря крізь пористий матеріал дорівнює $q_m = -k \nabla P^m$ (k – коефіцієнт повітропроникнення). Позначивши $a_m \rho_0 \delta_p = a_p$, отримаємо:

$$q_m = -a_m \rho_0 \delta_p \nabla P = -a_p \nabla P, \quad (6.53)$$

де a_p – коефіцієнт масопроникності; ρ_0 – середня густина; δ_p – коефіцієнт перенесення маси за наявності тиску.

За низьких температур, коли волога рухається у вигляді рідини, a_p характеризує вологопроникність матеріалу за надлишкового тиску. За високих температур, коли волога рухається у вигляді пари, коефіцієнт a_p характеризує паропроникність матеріалу.

Загальну щільність потоку вологи в матеріалі q_m можна представити як суму щільності часткових потоків q_{mi} , q_{mt} і q_{mp} :

$$q_m = |q_{mi}| + |q_{mt}| + |q_{mp}|, \quad (6.54)$$

де q_m – фільтраційний потік вологого повітря; q_{mt} – потік маси внаслідок термопроникності за наявності градієнта температури; q_{mp} – потік маси внаслідок дії рідини.

Рівняння щільності потоку маси в загальному вигляді можна записати так:

$$q_m = a_m \rho_0 \delta \nabla U - a_m \rho_0 \delta \nabla t - a_p \nabla P, \quad (6.52)$$

де q_m – щільність потоку вологи, який переміщається в матеріалі за одиницю часу через одиницю поверхні; a_m – коефіцієнт потенціалопровідності; ρ_0 – середня густина матеріалу; δ – коефіцієнт перенесення маси внаслідок термовологопровідності; ∇U , ∇t і ∇P – відповідно градієнт вологовмісту, температури і тиску.

Значення величини q_m підставимо в рівняння (6.47) і отримаємо рівняння, яке визначає поширення тепла в матеріалі з урахуванням масообміну:

$$q = -\lambda \nabla t + i' q_m = -\lambda \nabla t + i' (-a_m \rho_0 \nabla U - a_m \rho_0 \delta \nabla t - a_p \nabla P), \quad (6.56)$$

де $i' q_m = i' (-a_m \rho_0 \nabla U - a_m \rho_0 \delta \nabla t - a_p \nabla P)$ – ентальпія потоку маси за наявності градієнтів вологовмісту, температури і тиску.

Механізм тепло- і масообміну в процесі підвищення температури розглянемо на прикладі одномірного поля (рис. 6.6).

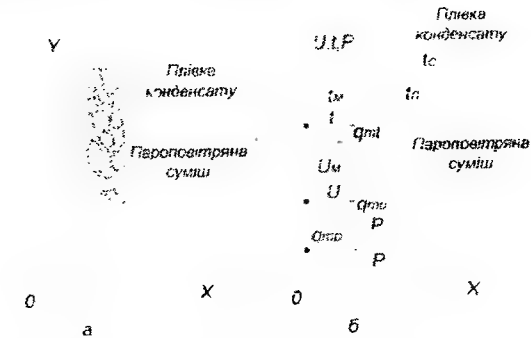


Рис. 6.6. Схема механізму тепло- і масообміну між матеріалом і пароповітряною сумішшю (стадія нагрівання): а – конденсація пари на поверхні матеріалу; б – конденсація пари на поверхні матеріалу з утворенням плівки конденсації

Температура матеріалу по осі X починає вирівнюватись, градієнт температури наближається до нуля ($\nabla t \rightarrow 0$), відповідно потік вологи завдяки ∇t направлений від поверхні до центра матеріалу, також наближається до нуля ($g_{mt} \rightarrow 0$). Пори матеріалу поступово заповнюються вологою. Перепад вологовмісту між поверхнею і серединою матеріалу зменшується. Градієнт вологовмісту і потік вологи за рахунок градієнта вологовмісту також поступово зменшується до нуля ($\nabla U_{(t)} \rightarrow 0$ і $g_{mi} \rightarrow 0$).

Одночасно внаслідок видавлювання повітря з пор і заміщення його вологою зменшується і градієнт тиску, а також потік води g_{mp} .

На цій стадії за атмосферного тиску водяна пара із пароповітряної суміші в робочому просторі теплової камери конденсується на поверхні матеріалу й утворює водяну плівку.

На кривій температур (див. рис. 6.4, б) температура середовища становить t_c , водяної плівки – t_p , температура матеріалу – t_m , причому $t_c < t_p < t_m$. Водяна пара з поверхні проникає в ці пори (див. рис. 6.4, а), конденсується в них, утворюючи плівку конденсату не тільки на поверхні, й всередині поверхневого шару матеріалу.

Далі процес відбувається таким чином: пара не може проникнути всередину матеріалу крізь плівку і віддає свою теплоту пароутворення. Поступово заповнюючи пори, пара утворює на поверхні матеріалу значну за товщиною плівку конденсату. Якщо пори несумірно малі, то плівка конденсату утворюється безпосередньо на поверхні матеріалу (див. рис. 6.4, б). Далі процес відбувається аналогічно: утворюються потоки води g_{mt} , g_{mu} і g_{mp} за рахунок градієнтів ∇t , ∇U і ∇P . Процес нагрівання триває доти, доки температура поверхні матеріалу не зрівняється з температурою теплоносія.

За ізоермічної витримки матеріалу механізм тепло- і масообміну може бути представлений, як на рис. 6.7.

На стадії охолодження пара із теплової камери видаляється, внаслідок випаровування води з поверхні матеріалу температура і її вологовміст знижуються. В матеріалі виникає градієнт температури ∇t і градієнт вологовмісту ∇U протилежного напрямку відносно розглянутих в процесах нагрівання й ізоермічної витримки. Відповідно до ∇t і ∇U виникає рух води до поверхні матеріалу g_{mt} і g_{mu} , що призводить до розрідження в порах матеріалу. Виникає градієнт тиску з напрямом від центру до

поверхні матеріалу, який гальмує рух води і призводить до заміщення води в порах повітрям.

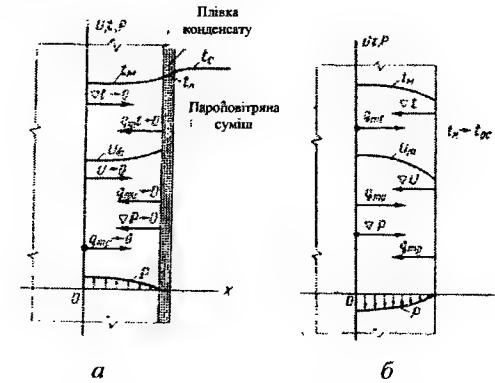


Рис. 6.7. Схема механізму тепло- і масообміну між матеріалом і парою в камері за атмосферного тиску:

а – період ізоермічної витримки; б – стадія охолодження

Унаслідок випаровування води з поверхні і зовнішнього конвективного теплообміну відбувається охолодження матеріалу.

Тепловологу обробку в автоклаві (рис. 6.8) виконують у герметично закритих посудинах і формах за надлишкового тиску. Процес тепловологої обробки в умовах надлишкового тиску можна розділити на п'ять етапів: 1) від початку впускання пари до досягнення температури в автоклаві 100 °С; 2) від початку збільшення тиску пари до встановлення заданого максимального тиску; 3) ізоермічне витримання виробів за сталої температури і тиску; 4) повільне і поступове зменшення тиску до атмосферного і температури до 100 °С; 5) зниження температури до 10...20 °С.

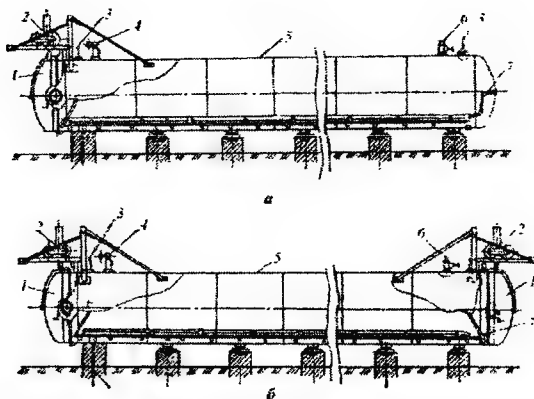


Рис. 6.8. Автоклави: а – тупиковий; б – прохідний;
1 – кришка; 2 – механізм для підймання й опускання кришки;
3 – манометри; 4 – запобіжний клапан; 5 – корпус;
6, 7, 8 – паровипускна та конденсаційна магістралі

У міру підвищення тиску під час тепловологої обробки в автоклаві до 0,8...1,2 МПа залишається нерівність між температурою середовища t_c , температурою плівки конденсату на поверхні матеріалу t_n і температурою матеріалу t_m .

За цих умов пара не перестає конденсуватися на поверхні матеріалу і не змінюються градієнти ∇t , ∇U і ∇P . Але в міру подальшого підвищення тиску відбувається поступове заповнення пор вологою і витіснення повітря, що призводить до зменшення ∇U і ∇P . Початок ізотермічної витримки супроводжується зменшенням ∇P . В цей час інколи трапляється викид вологи у вигляді пари.

На початку охолодження градієнт тиску ∇P за надлишкового тиску звичайно змінює свій знак, через що починається витіснення вологи із матеріалу. Вільний об'єм пор поступово заповнюється пароповітряною сумішшю, яка проривається назустріч потоку вологи з матеріалу. Ці процеси спричиняють різке охолодження поверхні і виникнення перепаду температур по перерізу матеріалу.

З цієї причини швидкість скидання пари з автоклава до атмосферного тиску є основним фактором, який визначає величину перепаду температур між поверхнею і серединою матеріалу.

6.7. Випалювання виробів

Поведінка матеріалів під час термічної обробки залежить від їх складу. Матеріали поділяють на мономінеральні і полімінеральні. Мономінеральні набувають потрібних властивостей звичайно в результаті спікання. У полімінеральних матеріалах в період термообробки можуть відбуватися різноманітні реакції.

Найбільш важливий процес термообробки керамічних виробів – спікання. Під час спікання під дією температури частинки твердого матеріалу з'єднуються в одне тіло; при цьому початкова пористість зазвичай зменшується. Спікання відбувається або без рідкої фази, або за наявності розплаву.

За спікання без розплаву в місця контакту окремих частинок надходить речовина з розміщених у безпосередній близькості груп частинок. Надходження речовини в місця контакту частинок відбувається завдяки в'язкості потоку, об'ємній вакантій і поверхневій дифузії атомів, а також випаровування і конденсації.

Під час спікання за наявності рідкої фази збуджувальним фактором є поверхневий натяг розплаву, який огортає (змочує) тверді частинки (рис. 6.9).

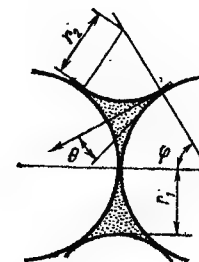


Рис. 6.9. Схема контакту зерен з прошарком рідкої фази

У реальних умовах випалювання відформованих виробів з глинистої сировини «черепок» складається з твердої і рідкої фази. За умови змочування рідка фаза зумовлює утворення на стику твердих частинок менісків у вигляді манжет. Це спричиняє виникнення стисливого капілярного зусилля (рис. 6.8). Повну величину цього зусилля можна визначити за залежністю:

$$F = \pi \sigma R \sin \varphi \left[R \sin \varphi \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) + 2 \sin (\varphi + \theta) \right],$$

де φ – кут, який залежить від кількості рідини і розмірів манжети;
 σ – поверхневий натяг на межі розподілу фаз «рідина – газ»;
 R – радіус твердих частинок; θ – крайовий кут змочування;
 r_1 і r_2 – радіуси кривизни поверхні рідини.

Величина стисливого зусилля залежить від багатьох параметрів. Наприклад, за деякого вмісту рідкої фази за повного змочування ($\theta = 0$) стисливе зусилля досягає максимального значення. У міру збільшення крайового кута змочування зусилля різко зменшується до нульового значення за $\theta_{кр} < 90^\circ$ і змінює знак, тобто з цього моменту відбувається відштовхування частинок одна від одної.

Така залежність зміни стисливого зусилля крайового кута θ справедлива за різної кількості рідини і характеризується кутом φ . При цьому збільшення φ за однакового значення θ призводить до зменшення стисливого зусилля F . За значень $\theta + \varphi / 2 < 90^\circ$ діє стисливе зусилля, а за значень $\theta + \varphi / 2 > 90^\circ$ – розтягування.

Збільшення радіуса частинок і поверхневого натягу рідини спричиняє підвищення стисливого зусилля.

Більшість підприємств з виготовлення керамічних виробів використовує глинисті породи. Крім глинистих мінералів, застосовують кремнезем, польові шпати, сульфати лужних і важких металів, карбонати, органічні речовини, мінерали системи ZrO_2 - SiO_2 та інші речовини, а також воду.

Такі матеріали за температури, близької до $250^\circ C$, втрачають зв'язану капілярними силами воду. Частина фізично зв'язаної води залишається в матеріалі за температури понад $100^\circ C$. Це зумовлене так званою капілярною конденсацією, тобто явищем, коли тиск над водною поверхнею в капілярах значно вищий, ніж атмосферний тиск. За температури $80...300^\circ C$ видаляються вуглеводи, які становлять основу формувального мастила. За температури, вищої від $300^\circ C$, починається окиснення в печі вільного кисню, або піроліз, якщо в атмосфері печі немає вільного кисню. За температури $450...650^\circ C$ хімічно зв'язана вода видаляється з основних глинистих мінералів – каоліну, ілініту, монтморилоніту, досягаючи максимальної швидкості в інтервалі $550...590^\circ C$ з утворенням дегідратованих структур глинистих мінералів за збільшення їх пористості. Пористість, яка утворюється в цій фазі і може бути визначена аналітично, називається *первинною пористістю*. В цьому інтервалі температур за наявності кисню в атмосфері печі вигорають залишки органічних матеріалів. За температури $850^\circ C$ структура, яка складається з дегідратованих мінералів глини, починає за участі вільних оксидів переходити в структуру муліту, тобто в головну кристалічну фазу керамічних матеріалів системи SiO_2 - Al_2O_3 . Одночасно з утворенням муліту починається розпад сульфідів, карбонатів і сульфатів. За температури близько $1050^\circ C$ збільшується частка розплаву. Матеріал з крихкого стану переходить в піропластичний, розплав починає заповнювати первинні пори, порушує їх неперервність і таким чином утворюються закриті пори. За температури, вищої за $1000^\circ C$, починається розклад оксидів заліза з виділенням елементарного кисню. У міру підвищення температури тиск газів всередині матеріалу підвищується і за температури $1300^\circ C$ досягає значення барометричного тиску. Якщо неперервність пор порушена і кисень, який утворюється, не видаляється з матеріалу або не з'єднується з ним, то пористість підвищується завдяки виникненню нових пор, заповнених киснем. Ця нова фаза називається *вторинною пористістю*. Найбільш важливим є руйнування в

розплаві так званого первинного муліту і кристалізація із розплаву вторинного голчастого муліту. За тривалого впливу постійної температури із склоподібної фази може утворюватися кристалічна. За наявності в атмосфері печі вуглецю може відбуватись відновлення деяких оксидів та їх випаровування. Відомо перетворення SiO_2 в SiO або навіть в елементарний кремній Si . За температури близько 1400°C випаровуються лужні оксиди. Речовини системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ за температури, вищої за 1150°C , переходять в муліт й оксид кремнію або в муліт і керунд; залежно від температури кремній може зазнавати модифікаційних перетворень.

Таким чином, спікання за наявності рідкої фази завжди характеризується наявністю розплаву, який внаслідок охолодження зумовлює наявність в матеріалі склофази.

Твердофазове спікання відбувається без рідкої фази або за такого незначного її вмісту, який не може вирішальним чином змінити механізм і кінетику процесу. Процес твердофазного спікання є типовим для випалювання виробів з тонкодисперсних порошків (порошкова металургія).

Процеси твердофазового спікання на основі дифузійного механізму перенесення речовини є найбільш поширеними. Можливість дифузії речовини у твердому тілі зумовлена наявністю дефектів кристалічної ґратки. Головну роль під час дифузії речовини у твердому тілі відіграють вакансії. Завдяки тепловому руху атом або іон переходить від одного вузла кристалічної ґратки на інший вакантний вузол і тим самим утворює нову вакансію, що створює можливість подальшого перебігу процесу.

У кожному кристалічному матеріалі за певної температури є рівноважна концентрація вакансій, яка залежить від інтенсивності теплового руху.

Вільна поверхнева енергія під час твердофазового спікання зменшується внаслідок утворення і подальшого збільшення загальної міжфазової поверхні між окремими частинками в пористому кристалічному тілі, що супроводжується виникненням так званого «містка», або «шийки» (рис. 6.10).

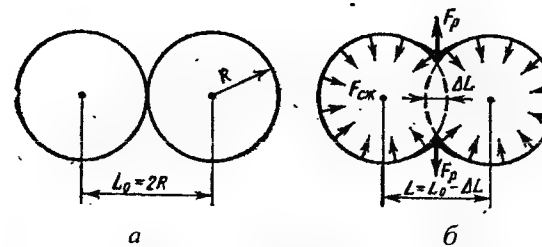


Рис. 6.10. Схема дифузійного спікання:
а – початковий тиск; б – схема утворення «містка»,
або «шийки», між окремими частинками

Ввігнута поверхня містка, яка розтягується силами поверхневого натягу, стає місцем підвищеної концентрації вакансій, тобто джерелом вакансій. В той же час опукла частина поверхні, яка стискується силами поверхневого натягу, є поглиначем вакансій.

Оскільки атоми починають набувати значної рухливості за температури близько $0,3...0,4$ температури плавлення, поверхнева дифузія відбувається за відносно низької температури.

Ущільнення під час спікання може бути лише за умови в'язкої течії або об'ємної дифузії.

Процес в'язкої течії являє собою пластичну деформацію під дією сил поверхневого натягу. Цей процес аналогічний руху рідини з коефіцієнтом в'язкості η . В'язкий рух кристалічних речовин відбувається внаслідок направленного переміщення вакансій кристалічної ґратки. Коефіцієнт в'язкості залежить від коефіцієнта дифузії.

Першим етапом спікання за механізмом в'язкого руху є злиття крапель, коли проміжки між частинками заповнюються і пори виявляються відокремленими (видалення відкритої корисності).

Другим етапом є закриття пор (в'язке заповнення), причому час повного закриття пори становить:

$$\tau = \frac{4 \eta \cdot r}{3 \sigma},$$

де η – динамічна в'язкість, $\text{н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$; r – радіус, м; σ – поверхневий натяг, $\text{н}/\text{м}$.

Процес дифузійного спікання можна інтенсифікувати шляхом збільшення ступеня дисперсності вихідного матеріалу, застосування матеріалів з підвищеною дефективністю кристалічної ґратки, введення добавок для утворення твердих розчинів з основним компонентом суміші.

Термічна обробка для більшості матеріалів є завершальним етапом. Дефекти виробів, які виникли на цій стадії, дуже часто є необоротними. Наступні додаткові операції пов'язані або з доведенням поверхні до потрібного рівня, або з усуненням дефектів, які утворились на стадії термообробки.

Запитання для самоперевірки

1. Охарактеризуйте теоретичні засади масообмінних процесів.
2. Які є способи вираження концентрації речовин?
3. Що являє собою матеріальний баланс масопередачі? Наведіть рівняння робочої лінії процесу.
4. У чому полягає перший закон Фіка?
5. Як можна отримати диференціальне рівняння молекулярної дифузії (другий закон Фіка)?
6. У чому полягає конвективна дифузія?
7. Наведіть критерії подібності масообміну.
8. Назвіть форми зв'язку вологи з матеріалом і її види.
9. У чому полягає суть процесів сушіння матеріалів за атмосферного тиску?
10. В чому полягає різниця між спіканням за наявності рідкої фази і твердофазовими спіканням у процесі випалювання керамічних матеріалів?
11. Наведіть класифікацію теплових апаратів для сушіння і випалювання будівельних матеріалів.

Розділ VII. ФОРМУВАННЯ ВИРОБІВ

Формування являє собою комплексний процес отримання виробів або конструкцій певної форми і розмірів і є одним з відповідальних процесів виготовлення будівельних матеріалів. Процес формування складається із заповнення формоутворювальної порожнини вихідною масою і її ущільнення.

Основними методами формування є напіссухе пресування, пластичне формування, шлікерне лиття, віброформування. Крім цих основних методів, застосовують також трамбування для виготовлення великих блоків і виробів, гаряче і гідростатичне пресування, центрифугування та інші.

7.1. Напіссухе пресування

Пресування виробів напіссухим методом відбувається в прес-формі за допомогою нижнього і верхнього пуансонів (рис. 7.1). Якщо пресування відбувається за вертикального переміщення одного або двох пуансонів, маса зменшується в об'ємі, що призводить до її ущільнення. Початкова висота маси h_1 зменшується на величину h_3 , а відформований матеріал набуває товщини h_2 . У зв'язку з тим, що площа перерізу прес-форми F є постійною, об'єм засипаної маси від Fh_1 зменшується до об'єму Fh_2 , причому об'єм видаленого повітря становить:

$$V_{\text{п}} = Fh_1 - Fh_2 = Fh_3. \quad (7.1)$$

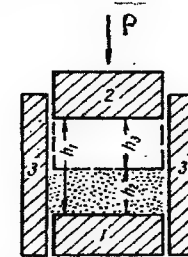


Рис. 7.1. Схема напіссухого пресування:
1, 2 – пуансони (штемплі); 3 – стінки форми

Об'єм видаленого повітря під час пресування зменшується за збільшення середньої насипної маси матеріалу і як наслідок зменшується величина h_3 .

Питомий тиск пресування, який передається масі через поверхню пресувального штемпеля, зменшується по висоті виробу внаслідок впливу сил зовнішнього тертя маси об стінки форми.

Загальний тиск P , потрібний для спресування маси, складається з тиску P_0 на ущільнення маси до заданої пористості за умови його рівномірного розподілу в об'ємі сирцю і відсутності сил зовнішнього тертя маси об стінки форми; із тиску P_1 для подолання сили зовнішнього тертя; із надлишкового тиску P_2 , спричиненого нерівномірним розподіленням тиску в окремих об'ємах маси внаслідок нерівномірності засипання її у форму. Тобто загальний тиск пресування становить:

$$P = P_0 + P_1 + P_2 . \quad (7.2)$$

Витрати тиску на подолання сил тертя маси об стінки форми визначають за формулою:

$$P_1 = P \cdot hf' \epsilon , \quad (7.3)$$

де ϵ – коефіцієнт бічного розпору.

Зміну величини питомого тиску по висоті відформованої маси визначають за рівнянням П. Баландіна:

$$P_h = P_0 \cdot e^{-k \frac{h}{R}} , \quad (7.4)$$

де P_h – величина питомого тиску на відстані h від пресувального пуансона; P_0 – величина питомого тиску на поверхні пресувального пуансона; k – коефіцієнт, який дорівнює $k = f \lg^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$; f' – коефіцієнт зовнішнього тертя маси по стінці форми; φ – кут природного укусу (коефіцієнт внутрішнього тертя); h – відстань від штампувального пуансона; R – гідравлічний радіус, $R = \frac{F}{\Pi}$, де F – площа зразка; Π – периметр зразка.

Перепад величин тиску по висоті визначає ступінь однорідності β , який оцінюється відношенням P_h до P_0 :

$$\beta = \frac{P_h}{P_0} = e^{-k \frac{h}{R}} . \quad (7.5)$$

Аналіз формули (7.4) свідчить, що ступінь однорідності не залежить від абсолютної величини тиску пресування. Максимальне значення β досягається за зменшення товщини сирцю і його периметра і збільшення площі прикладення тиску. Унаслідок зменшення коефіцієнтів зовнішнього і внутрішнього тертя однорідність пресування підвищується. На величину однорідності впливає рідина, яка зволожує масу.

Наявність сил зовнішнього тертя призводить до того, що однакові за масою порції суміші ущільнюються в елементи різної товщини, які збільшуються в міру віддалення від пресувального пуансона.

Найбільша щільність верхнього елемента відформованого сирцю досягається біля стінок форми, зменшуючись в напрямку до центра. Внаслідок дії сил зовнішнього тертя тиск досягає максимального значення на периферії виробу і мінімального – в центрі.

Одним з факторів, який визначає ступінь ущільнення сирцю, є питомий тиск. Звичайно вважають, що пористість однакова для всього об'єму. Між пористістю і питомим тиском є гіперболічна залежність, яку визначають рівнянням А. Бережного:

$$\Pi = a - e \lg P , \quad (7.6)$$

де Π – пористість, %; P – питомий тиск пресування, МПа; a, e – постійні, які характеризують властивості сумішей.

Величина a характеризує здатність суміші заповнювати форму без зовнішніх зусиль і не залежить від конфігурації і розмірів елемента. Величина e характеризує вплив тиску на щільність суміші і залежить від конфігурації і розмірів сирцю та відношення площі перерізу до товщини або бічної поверхні виробу.

Аналізуючи рівняння (7.6), доходимо висновку: якщо збільшувати питомий тиск в геометричній прогресії із знаменником h , то різниця у величинах пористості послідовних пресовок є постійною величиною, тобто пористість виробів зменшується в арифметичній прогресії.

$$m = e \lg n. \quad (7.7)$$

Дуже часто виникає потреба в пресуванні виробів із змінними перерізами в напрямку, перпендикулярному дії тиску, наприклад, зрізаних пірамід, конусів, тобто виробів, у яких вертикальні стінки мають нахил. В цьому випадку має значення, на яку основу передається тиск. Якщо передача тиску відбувається в напрямку від більшої основи до меншої, то виникає дуже великий перепад тисків по висоті. В результаті протилежна частина об'єму виробу не буде задовільно пропресована. Навпаки, за передачі тиску уздовж розбіжних стінок форми витрати тиску мінімальні.

Ущільнення суміші значно погіршується в разі формування виробу з різною висотою, внаслідок чого потрібен перерозподіл маси між різними частинами виробу для досягнення однакової щільності. Тому в міру збільшення ступеня потрібного перерозподілу суміші збільшується різниця в ущільненні різновисоких частин сирцю, причому збільшення величини тиску не призводить до отримання однорідної щільності в цих частинах. Кращих результатів досягають, застосовуючи для ущільнення фігурний пуансон.

Зменшення ефективності через підвищення питомого тиску для зменшення пористості пов'язане з тим, що зерна суміші в результаті ущільнення втрачають здатність до переміщення, через що виникає пружна, пластична і крихка деформації зерен. Крихка деформація відбувається тому, що внаслідок передачі навантаження через малі поверхні контакту зерен виникають дуже великі напруження, що призводить до їх руйнування.

Пластична деформація зерен практично не відбувається, натомість виникає пружна деформація, яка характеризується незначними переміщеннями і впливом на зниження пористості.

Тому після припинення навантаження відформований виріб пружно розширюється по висоті. Розширення збільшується внаслідок зменшення міцності зв'язку зерен між собою.

Встановлено, що збільшення питомого тиску пресування призводить до збільшення пружного розширення. За підвищення вологості формувальної суміші збільшується вірогідність миттєвого розширення після усунення навантаження. Для зменшення пружного розширення рекомендується повільне і ступінчасте пресування.

Повітря, яке міститься у формувальній суміші, відіграє значну роль. Прикладання до суміші тиску супроводжується закриттям повітряних каналів і поступовим припиненням витіснення повітря з виробу.

Інтервал тиску, в межах якого відбувається витіснення повітря, залежить від сировинного і зернового складу сумішей. Коефіцієнт запресовування (відношення кількості приведенного до нормальних умов запресованого повітря до його кількості в суміші) коливається в широких межах, може сягати 0,7. Він зростає разом із збільшенням об'єму виробу, вмісту в суміші дисперсних і глинистих частинок та швидкості прикладання навантаження і практично не залежить від величини питомого тиску пресування.

Пружне розширення може суттєво зменшувати середню густину виробів, спричиняє анізотропію структури і є однією з причин утворення тріщин перепресування. Слід мати на увазі, що до розшарування схильні як надмірно сухі суміші, так і надто вологі.

Нерівномірне ущільнення виробу зумовлює різне пружне розширення окремих шарів і їх міцність на розрив і зсув. Неоднаково ущільнені шари характеризуються різним розширенням і прагнуть відірватися один від одного внаслідок виникнення напружень розриву і зсуву між ними. Тріщини розшарування завжди перпендикулярні напрямку дії тиску. Вони утворюються інтенсивніше під час формування виробів із тонкозернистих сумішей. Доведено, що крупнозернисті суміші забезпечують більш високу міцність за однакового вмісту тонких фракцій.

Для зменшення вірогідності утворення тріщин розшарування треба застосовувати двостороннє пресування, підвищення пластичності суміші, крупності зернового складу та зменшення коефіцієнта зовнішнього тертя. Завдяки цьому збільшується однорідність виробу в результаті зменшення перепаду тиску по товщині і більш рівномірного розподілу тиску в окремих елементах виробу. Доцільно надавати конусність формі $\sim 1\%$ по висоті в напрямку випресування відформованого виробу.

Суттєвим впливом на величину пружного розширення є вплив допустимої швидкості прикладання тиску на різних стадіях пресування.

На початковій стадії пресування, коли відбувається тільки зближення зерен суміші без їх зчеплення, зміна швидкості пресування в межах 0,08...100 мм/с не впливає на фізико-технічні властивості сирцю (густину, міцність і пружне розширення).

На другій стадії пресування зменшується значна кількість пустот між зернами суміші, які переміщуються одне відносно одного за значного тертя і зчеплення. Збільшення швидкості на цій стадії пресування до 8...9 мм/с не впливає на якість сирцю. За подальшого підвищення швидкості зменшується осідання суміші, знижується міцність сирцю і можуть утворюватися тріщини. Витримка тиску не приводить до покращення якості сирцю і зменшення його пружного розширення.

На третій стадії пресування відбувається ущільнення з частковим руйнуванням зерен суміші. Після усунення тиску в сирці виникає пружне розширення. За швидкості пресування близько 1 мм/с фізико-механічні показники відформованого виробу не зменшуються, за збільшення швидкості до 2 мм/с вони незначно змінюються, а за швидкості 2,5 мм/с і більше зменшується щільність і значно збільшується пружне розширення. Витримка тиску на третій стадії дає змогу знизити пружне розширення до мінімуму.

Методом напівсухого пресування отримують відформовані вироби з пористістю близько 20 %. Величина тиску при цьому становить 15...60 МПа. Для отримання сирцю з пористістю 10 %

потрібен тиск, згідно з формулою (7.5), 70...90 МПа. Пресів, які справляють такий тиск, в технології будівельних матеріалів не застосовують. Великих значень тиску досягають, за допомогою методу вибуху.

Зняття відформованих виробів й укладання їх на пічні вагонетки важко механізувати.

Механізацію зняття й укладення сирцю на вагонетки здійснюють за різними схемами.

За розміщенням пічних вагонеток безпосередньо біля пресів для виготовлення однотипних виробів застосовують укладальники різних типів.

За віддаленого розміщення вагонеток вироби зі стола преса знімають механічно й укладають в укрупнені елементи садки: переміщують до садочних місць і маніпулятором укладають на вагонетки.

Однак у виробництві є операції, для яких завдання «зняти – укласти» потрібно розв'язувати в умовах частої зміни потоків різнотипної продукції. Прикладом може бути зняття складних й особливо складних фасонних виробів з укладанням їх на піддон.

Такими гнучкими засобами технологічного оснащення є маніпулятори і промислові роботи.

Різновидами методу напівсухого пресування є гідростатичний (ізостатичний) і гарячий методи пресування.

Гідростатичне пресування

Суть гідростатичного методу пресування полягає в такому. Формувальну масу засипають в гумову або пластмасову форму і вставляють у циліндр з рідиною (водою, водною емульсією, гліцерином, оливою), піддають вібрації і вакуумуванню. Тиск передається на суміш крізь гумову оболонку. Можливі дві схеми ущільнення суміші (рис. 7.2):

– суміш укладають у гумову оболонку, тиск діє на зовнішню поверхню оболонки і притискує суміш до внутрішнього осердя;

– суміш укладають між гумовою оболонкою і зовнішньою стінкою форми, а в гумову оболонку нагнітають рідину.

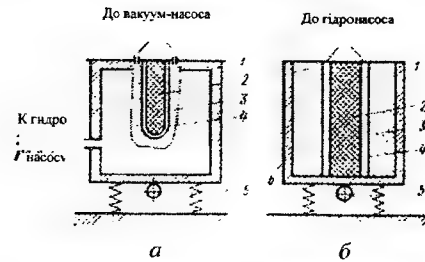


Рис. 7.2. Схема гідропресування:

а – зовнішнє обпресування; б – внутрішнє обпресування;
1 – зовнішня стінка прес-камери; 2 – осердя; 3 – суміш;
4 – гумова оболонка; 5 – вібратор; 6 – зовнішня стінка форми

Потім системою насосів створюють тиск рідини 25...700 МПа. Суміш всебічно обтискують, отримані вироби характеризуються рівномірною щільністю й ізотропною структурою. Тривалість витримки, що залежить від розмірів виробу, становить декілька хвилин.

Особливістю гідростатичного методу пресування є те, що зовнішнє тертя суміші об стінки форми, на відміну від звичайного пресування, не відбувається. При цьому зерна суміші, прилеглі до оболонки, переміщуються разом з нею в напрямку до центра виробу. Як наслідок не виникає надтиску, який є за неоднакової щільності засипки і наявності бічного тиску.

Під час гідростатичного пресування відбувається саморегулювання щільності у зв'язку з тим, що ущільнення відбувається незалежно для кожної зони виробу. Основною перевагою цього методу порівняно з напівсухим пресуванням (одно- і двостороннім) є прикладання однакового тиску до всієї поверхні виробу без витрат на подолання зовнішнього тертя. Цей метод технологічно більш зручний для виготовлення виробів великих розмірів, а також вигідний в енергетичному відношенні, зважаючи на зниження пористості готових виробів не внаслідок випалювання, а завдяки застосуванню менш енергоємних процесів. Площа міжзернових

контактів за однакових умов приблизно на 38 % більша, ніж за звичайного пресування, що підвищує швидкість твердофазових реакцій і зменшує усадку виробів під час їх випалювання.

Застосовуючи гідростатичний метод, виготовляють високоглиноземисті вироби, графітошамотні виливниці, тигелі, трубки, цирконові і корундові блоки, наконечники для ракет, ковпаки для радарів, залізобетонні труби і різні вироби складної форми.

Зазначимо, що за високого тиску і ступеня ущільнення преси і форми для звичайного пресування громіздкі і дорогі, обладнання для гідростатичного ущільнення значно простіше, менш габаритне і дешевше.

За надвисокого тиску зусилля в циліндрі гідростатичного преса утворюється внаслідок вибуху. Пресування внаслідок вибуху принципово відрізняється тим, що в результаті надвисокого тиску миттєвої дії відбуваються глибокі зміни кристалічної ґратки речовини.

Останніми роками інтенсивно розвивається технологія електрогідроімпульсного пресування (ЕГПІ) тонкодисперсних порошків. Імпульсний тиск в робочій камері, заповненій водою, утворюється в результаті високовольтного розряду батареї конденсаторів. За енергії розряду 60 кДж потужність сягає 0,1 ГВт, а в рідині виникає імпульсний тиск близько 150 МПа.

Гаряче пресування

Процес формування являє собою одночасне ущільнення і зміцнення виробу внаслідок тиску і спікання. Перевагою методу є значне зменшення тривалості спікання – від годин до хвилин, можливість використання активних і тонкодисперсних матеріалів без попередньої підготовки, отримання виробів майже з теоретичною густиною.

Розрізняють гаряче пресування за високої температури (> 1400 °C) і низького тиску (до 25 МПа) та за низьких температур (< 1200 °C) і високого тиску (70...140 МПа).

Для гарячого пресування характерно, що за визначених тиску і температури щільність пресування досягає деякого значення і не збільшується в подальшому за збільшення часу прикладання тиску.

З-поміж двох параметрів пресування (тиск і температура) більш ефективним є підвищення температури.

Методом гарячого пресування виготовляють вироби з глини, каолінів, оксидів, безкисневих сполук. Глини і каоліни в термопластичному стані підлягають закону Бінгама – Шведова.

Для зниження температури процес пресування рекомендується здійснювати за температури розкладання сировини. *Цей метод дістав назву реактивного гарячого пресування.*

Найчастіше гаряче пресування застосовують у виробництві будівельних матеріалів – деревностружкових плит, паперових пластиків і склопластиків, теплоізоляційних термопластів тощо.

Унаслідок високої щільності і тонкозернистої структури вироби, виготовлені за методом гарячого пресування, є переважно нетерmostійкими.

7.2. Метод пластичного формування

Виробництво за пластичним методом найбільш поширене у виготовленні стінової кераміки, полімерних матеріалів, азбоцементних виробів, деяких дрібноштучних бетонних блоків.

Здатність глинистої маси формуватися зумовлена її структурно-механічними характеристиками. Ці властивості описуються такими константами:

$$E_1 = \frac{P}{\varepsilon_0} \quad - \text{ умовно-миттєвий модуль пружності, який}$$

відповідає пружній деформації ε_0 ; після зняття навантаження

$$\text{деформація } \varepsilon_0 \text{ пружно зникає; } E_2 = \frac{P}{\varepsilon_m - \varepsilon_0} \quad - \text{ еластичний модуль,}$$

який означає повний розвиток еластичної деформації ε_m ;

η_0^* – найбільша пластична (шведовська) в'язкість; P_{k1} – умовна

$$\text{статична межа текучесті; } \lambda = \frac{E_1}{E_1 + E_2} \quad - \text{ еластичність; } \frac{P_{k1}}{\eta_0^*}$$

$$\text{пластичність за Воларовичем; } \theta = \frac{\eta_0^*}{E_1 + E_2} \quad - \text{ період релаксації.}$$

Значення структурно-механічних показників пластичної маси для формування полягає в тому, що залежність між величиною зусилля зсуву і ступенем руйнування структури дає змогу встановити величину допустимого зусилля, з яким прямо пов'язаний типовий дефект пластичного формування – завилькуватість.

Фізична суть завилькуватості в тому, що за великого опору в головці преса маса рухається з різною швидкістю по перерізу бруса. При цьому внутрішнє напруження в масі може бути настільки велике, що відбувається розрив й окремі шари маси ковзають по концентричних поверхнях, і, як наслідок, утворюється завилькуватість.

Якщо зсув не поширюється по всьому перерізу потоку маси, то центральна ділянка маси рухається суцільним стрижнем. На реологічній кривій залежності виразу $\lg \eta - P$ (рис. 4.19) відповідає ділянка максимальної пластичної (шведовської) в'язкості η_0^* . Характерною величиною такого руху є умовна межа практично незруйнованої структури P_r^1 .

Якщо зусилля зсуву поширюється по всьому перерізу потоку маси без зрізання і ковзання одних шарів відносно інших, то такому руху на реологічній кривій відповідає ділянка руху маси із структурою, яка починає руйнуватись. Критерієм такого типу руху є умовна динамічна (бінгамівська) межа текучесті P_{k2} .

Для того щоб не утворювалася завилькуватість, напруження в масі і відповідне зусилля не повинні перевищувати значень P_r^1 і P_{k2} . Цих умов досягають завдяки зменшенню діаметра корпусу ланцюгового преса і збільшенню діаметра лопатевого гвинта, тобто зменшенню товщини пласта маси.

Для формувальних глин встановлено такі значення структурно-механічних характеристик: λ – не менш як 0,6...0,65; $\frac{P_k}{\eta_0^*}$ – не менш ніж $(2,0...2,5) \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$; θ – не менш як 300...350 секунд.

Під час формування виробів з пластичної глинистої маси в ланцюгових пресах деформація стиску відбувається з одночасним зсувом маси в процесі її ущільнення.

Маса в циліндрі ланцюгового преса ущільнюється завдяки переміщенню частинок під дією зусилля P поршневого нагнітача, яке діє паралельно осі преса і бічного тиску q_0 , спрямованого перпендикулярно до стінки преса.

Бічний тиск визначають за формулою:

$$q_0 = \xi \cdot P, \quad (7.8)$$

де P – зусилля преса; ξ – коефіцієнт бічного тиску.

Бічний тиск спричиняє тертя маси по стінці циліндра 1, пресувальної головки 2 і мундштука 3 (рис. 7.3).

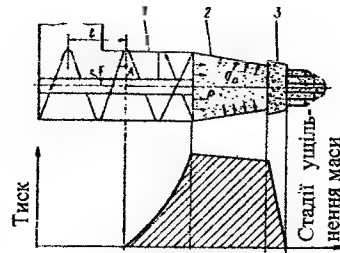


Рис. 7.3. Схема ущільнення глинистої маси в ланцюговому пресі:
1 – циліндр; 2 – пресувальна головка; 3 – мундштук

У ланцюгових пресах глиниста маса під дією лопатевого гвинта здійснює рух, який складається з обертального руху навколо осі гвинта і поступального – вздовж його осі.

Швидкість обертального руху частинки маси дорівнює:

$$v_k = \omega r = 2\pi r n, \quad (7.9)$$

де ω – кутова швидкість частинки, рад/с; r – відстань частинки до осі гвинта, м; n – частота обертання гвинта, с^{-1} .

Поступальну швидкість частинки визначають за формулою:

$$v_{\text{п}} = t n, \quad (7.10)$$

де t – крок гвинта, м.

Значення частоти обертання гвинта із рівняння (7.9) становить $n = \frac{\omega}{2\pi}$, підставивши його в рівняння (7.10), отримаємо:

$$v_{\text{п}} = \frac{\omega t}{2\pi}. \quad (7.11)$$

Рівняння (7.9) і (7.10) означають, що в міру збільшення відстані від частинки до осі обертання кутова швидкість збільшується, а поступальна швидкість залишається постійною. Сумарна швидкість частинки дорівнює геометричній сумі:

$$v_p = \sqrt{v_k^2 + v_{\text{п}}^2} = \sqrt{\omega^2 r^2 + \frac{\omega^2 t^2}{4\pi^2}} = \omega r \sqrt{1 + \frac{t^2}{4\pi^2 r^2}}. \quad (7.12)$$

Сумарна швидкість частинки збільшується і на зовнішній кромці лопаті гвинта має максимальне значення.

Формування виробів пластичним способом складається із двох послідовних процесів. Спочатку відбувається допресування маси в циліндрі, далі – видавлювання маси з циліндра більшого перерізу через мундштук меншого перерізу. Поблизу мундштука починається розшарування маси внаслідок того, що центральна частина маси рухається швидше ніж периферійна. Шлях переміщення зовнішньої частини довший, ніж внутрішніх. Подібне розшарування є нормальним і не може бути ліквідоване з огляду на суть процесу пластичного формування.

Ділянка основної деформації глинистої маси розміщена в розтрубі мундштука.

На цій ділянці за недостатньої пластичності руйнується суцільність бруса і, як наслідок, відбувається розущільнення маси. Такий характер переміщення маси із циліндра через мундштук зумовлює утворення специфічної структури. Під час переміщення маси через мундштук анізотричні довгасті і пластинчасті зерна

розміщуються своєю довгою гранню паралельно осі мундштука, тобто вздовж дії зусилля формування, а в циліндрі ці частинки розміщені перпендикулярно напрямку зусилля. Чим менша анізотричність зерен і коротший шлях їх переміщення, тим структура виробу більш однорідна.

Під час виходу відформованої маси з мундштука випередження внутрішніх шарів повинно припинитися, але цього не відбувається. В результаті на периферії виробу виникають розтягувальні зусилля, які можуть призвести до утворення поверхневих тріщин. Для уникнення цього дефекту треба зменшувати ступінь обтиснення маси і коефіцієнт тертя маси по стінці мундштука.

Пружне розширення під час виходу маси через мундштук також може спричиняти утворення тріщин у формі «драконогового зуба». Цьому дефекту можна запобігти, зменшивши швидкість видавлювання. Зусилля видавлювання через мундштук залежить від структурно-механічних властивостей, які можна визначити із залежності:

$$P = 4\pi \frac{(D-d)D^2 v_n}{d^2 \operatorname{tg} \alpha} \eta_m + \frac{2\pi(D-d)D^2}{3d \operatorname{tg} \alpha} \cdot P_{k_2}, \quad (7.13)$$

де D – діаметр циліндра преса, м; d – діаметр вихідного отвору мундштука, м; v_n – швидкість видавлювання маси, м/с; η_m – в'язкість практично зруйнованої структури; P_{k_2} – умовна динамічна (бінгамівська) межа текучесті; α – кут конуса воронки, який утворюється за сталого потоку $\sim 45^\circ$.

Використання неіластичних вихідних матеріалів потребує достатньо тонкого помелу і додавання пластифікаторів. Як пластифікатори застосовують парафін, віск, полівініловий спирт, декстрин, альгінати лугів, фенолформальдегідну смолу тощо, а також ПАР, наприклад, жирні кислоти.

Для пластифікованих мас $\eta_m = (10 \dots 40) \text{ кН} \cdot \text{с/м}^2$,
 $P_{k_2} = 100 \dots 1000 \text{ кН/м}^2$.

За підвищення кількості пластифікатора потрібне зусилля видавлювання зменшується, але в той же час збільшується пористість внаслідок їх випалювання за температури $400 \dots 450^\circ \text{C}$. Деякі з них утворюють $0,5 \dots 2,5\%$ попелу, а у відновлювальному середовищі вони здатні коксуватися. На це треба зважати під час виготовлення виробів з чистих сполук.

7.3. Метод шлікерного лиття

Суть методу полягає в тому, що рухливу формувальну масу заливають у форму, де під дією ваги вона рівномірно розподіляється в об'ємі форми. Метод застосовують для виготовлення керамічних тонкостінних виробів складної геометричної форми: санітарно-технічних, облицзовальних, декоративних плиток і виробів із силіконових розплавів, ніздрюватих бетонів, різноманітних пінопластів, вогнетривів.

Шлікер із тонкомеленого матеріалу – мікрогетерогенна система, яка складається з твердої дисперсної фази і рідкого дисперсного середовища, тобто він являє собою суспензію. За властивостями суспензії багато в чому подібні до колоїдних систем, але дещо відрізняються від них. Так, частинки суспензій мають більші розміри; розмір їх частинок знаходиться в межах $1 \cdot 10^{-4}$ см, а колоїдних систем – в межах $1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-7}$ см. Суспензії різко відрізняються від колоїдних золь за оптичними властивостями. Водночас частинки суспензії, як і золі, мають подвійний електричний шар, коагулюють під дією електролітів, утворюють у певних умовах просторові коагуляційні структури.

Суспензіям властива тиксотронія, тобто зрідження за механічного перемішування і зворотний перехід в структурований стан у спокої. Явище седиментації, специфічне для цих систем, характеризує їх, на відміну від колоїдних, як кінетично нестійкі.

Суттєве значення для застосування шлікерів має їх коагуляція. Вона виникає під впливом таких причин, як старіння за тривалого зберігання, зміна концентрації твердої фази і температури і деяких

інших факторів. Але найбільше значення для коагуляції має введення в суспензію електролітів. Для того щоб електроліт спричинив коагуляцію, потрібно, щоб його концентрація була більшою за мінімальну концентрацію, яку називають порогом коагуляції. Коагуляційна сила іонів збільшується залежно від їх валентності і радіуса іона.

Лиття виробів із шлікерів здійснюють в гіпсові форми. Здатність гіпсової форми осаджувати на свої поверхні шар твердих частинок в результаті відсмоктування рідкої фази із налитого шлікера пояснюються її пористою структурою.

На швидкість набору виливки («черепка») впливає вологість форми, яка після сушіння повинна становити ~5%. Швидкість всмоктування води формою становить $0,38...0,08 \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{хв})$. Виготовляючи форми, рекомендується вакуумувати гіпсовий розчин, що підвищує їх міцність ($R_{\text{згин}}$ – на 30...35%, R_p – на 15...20%); швидкість набору «черепка» – на 15...30%.

Набір «черепка» на поверхні гіпсової форми являє собою дифузійний процес. У початковий період процес визначається адсорбцією рідкої фази шлікера пористою стінкою форми. В цей момент на ній утворюється тонкий шар твердої фази. В подальшому для неперервного набору «черепка» рідка фаза повинна фільтруватися крізь цей шар. Таким чином, система має три складових – стінки форми, відкладений шар твердої фази і шлікер. Відстань X , на яку дифундує вода у форму за час τ , визначається рівнянням:

$$X^2 = D_B \cdot \tau, \quad (7.14)$$

де D_B – коефіцієнт дифузії води у форму.

Величина D_B знаходиться в межах $(6...17) \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$. Форма відсмоктує воду із шлікера через відкладений шар твердої фази, і концентрація води зменшується від центральної частини об'єму шлікера в напрямку до шару і форми (рис. 7.3). З'ясовано, що

кінетика збільшення товщини відкладеного «черепка» визначається залежністю:

$$l = K\sqrt{\tau}, \quad (7.15)$$

де K – постійна величина, яка залежить від проникності шару.

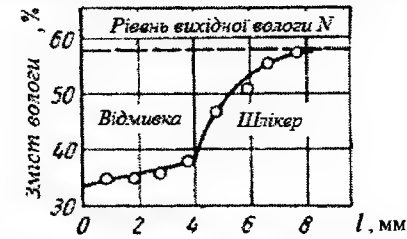


Рис. 7.3. Залежність вмісту води в шлікері від відстані між шаром і стінкою форми

Швидкість набору «черепка» можна підвищити завдяки вакуумуванню зовнішніх стінок форми. Ефективність вакуумування підвищується за збільшення температури процесу. Аналогічний результат отримують завдяки підвищенню тиску на шлікер. Можливе одночасне застосування цих технологічних прийомів.

Застосування вібрації в процесі лиття підвищує міцність виливок і зменшує тривалість набору «черепка». Для значного прискорення процесу лиття між гіпсовою формою і шлікером створюють електричне поле.

У процесі вакуумування шлікер звільняється від найдрібніших повітряних бульбашок, внаслідок чого покращується структура набраної виливки.

Зміна pH впливає на в'язкість шлікера, швидкість набору, щільність виливок й агрегацію частинок твердої фази.

Окрім лиття в гіпсові форми, на практиці застосовують лиття з термопластифікованих шлікерів в металеві форми. Цей метод дає змогу виготовляти вироби дуже складної конфігурації, механізувати й автоматизувати операцію лиття, виконувати обробку відформованих виробів.

7.4. Вібраційне формування

Процес вібраційного формування полягає в руйнуванні структури суміші, яка випадково утворилася під час перемішування й утворення нової, більш щільної і стійкої структури.

Віброформування – це гармонійний процес, який характеризується параметрами, основні з яких – величина збуджувальної сили, амплітуди, частоти, інтенсивності і тривалості вібрації.

Частинки зволоженої маси, засипаної у форму, перебувають в рівноважному стані під дією сил тяжіння, тертя і зчеплення. Якщо масу піддавати вібрації, сили тертя і зчеплення зменшуються. Це пояснюється тим, що під час вібрації середня швидкість руху одних частинок відносно інших визначається добутком частоти коливань ω на їх амплітуду A :

$$\bar{v} = \omega A = 2\pi A f, \quad (7.16)$$

де f – частота коливань.

Коефіцієнт внутрішнього тертя k маси пов'язаний із середньою швидкістю. Збільшення величини ωA наближає значення k до деякої мінімальної величини, яка характеризує тертя в стані спокою (рис. 7.4). Завдяки цьому маса набуває високої рухливості і частинки укладаються щільніше.

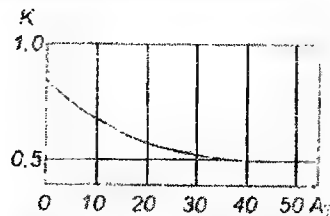


Рис. 7.4. Залежність коефіцієнта внутрішнього тертя від середньої швидкості руху частинок $A\omega$

Ефективність віброущільнення залежить як від реологічних властивостей суміші, так і від параметрів вібрації. До параметрів віброущільнення належить амплітуда коливань A , частота коливань f і тривалість процесу τ . Встановлено, що окремі параметри віброущільнення не характеризують ефекту ущільнення. Якість

ущільнення визначається сукупністю цих параметрів, критеріями яких є швидкість коливань $A\omega$, прискорення коливань $A\omega^2$ й інтенсивність коливань $A^2\omega^2$ (ω – кутова швидкість).

Інтенсивність коливань характеризує потужність потоку енергії, потрібної для коливання бетонної суміші.

Найбільш достовірним критерієм для оцінки інтенсивності віброформування є критерій В. Шмигальського, який для колових гармонійних коливань має такий вигляд:

$$I = A^2\omega^3 = 0,001 A^2 f^3,$$

де A – амплітуда коливань, см; ω – кутова швидкість коливань, $2\pi f$; рад/с; f – частота коливань, Гц.

Збільшення інтенсивності віброформування відбувається переважно завдяки підвищенню частоти через те, що збільшення амплітуди в деяких випадках призводить до розшарування суміші.

Під час віброформування рідина в масі виконує роль мастила, яке зменшує тертя між частинками і структурну в'язкість. Ущільнений шар маси має власну частоту коливань. Важливою технологічною характеристикою процесу вібрації є поширення коливань в суміші і їх згасання.

Зважаючи на те, що будь-яка суміш є пружно в'язкопластичним середовищем, коливання згасають в ній залежно від відстані джерела коливань. Інтенсивність згасання залежить від параметрів коливального процесу й описується закономірністю:

$$\frac{A}{A_0} = \sqrt{\frac{r}{r_0}} e^{-\frac{\alpha}{2}(r-r_0)}, \quad (7.18)$$

де A_0 , A – амплітуда коливань джерела, отже, і суміші на відстані r ; r_0 – відстань від центра тяжіння джерела до місця прикладання віброімпульсів до суміші; α – коефіцієнт згасання коливань, залежить від в'язкості суміші.

Процес віброформування є достатньо енергоємним, тому важливо визначити оптимальну тривалість процесу, яка залежить від багатьох факторів – частоти, амплітуди коливань, в'язкості

суміші, зернового складу тощо. Визначають тривалість процесу експериментально.

У загальному випадку за одночастотної вібрації віддають перевагу більшим амплітудам, які спричиняють більші переміщення маси.

Але якщо сили тяжіння частинок недостатні для інтенсивного ущільнення, то великі амплітуди можуть призвести до руйнування верхнього шару виробу. Для запобігання цьому дефекту слід прикласти до маси зовнішнє зусилля (привантаження). Цей прийом застосовують і для ущільнення особливо жорстких бетонних сумішей.

Оптимальна частота віброформування залежить від розміру частинок. У разі зменшення їх розмірів рекомендується більш висока частота і менша амплітуда, якщо частинки однакового розміру, в інших випадках раціонально застосувати багаточастотну вібрацію. За однакових розмірів важчі частинки укладаються швидше, ніж легкі, на всіх частотах формування.

Основне ущільнення відбувається в початковий період вібрації, а потім різко зменшується і припиняється. Тривалість вібрації зростає внаслідок збільшення маси. За збільшення вологості величина оптимального прискорення зростає, а максимальний коефіцієнт ущільнення зменшується.

Під час віброформування виробів не відбувається пружного розширення ще й через те, що формування за низького тиску не спричиняє деформації або зумовлює тільки незначну пружну деформацію частинок. За такого тиску не руйнуються контакти між частинками, а навпаки, відбувається більш міцне заклинування, завдяки цьому досягають високої міцності відформованого виробу.

Під час віброформування зволоження сумішей сприяє ущільненню виробу і прискоренню процесу; оптимальною є вологість, яка відповідає водопоглинанню ущільненого виробу. За більш високої вологості, а також коли її надлишок не видаляють з форми, зменшується щільність відформованого сирцю, тому на практиці надлишок води видаляють з форми.

Застосування віброформування дає ефективні результати, коли для отримання належного ступеня ущільнення потрібен високий тиск пресування. Цей метод технологічно доцільний, його застосування сприяє рівномірній щільності сирцю і запобігає виникненню внутрішніх напружень.

Тривалість віброформування невелика; вона залежить від форми і розміру частинок. Інтенсивність ущільнення в часі не залишається постійною, в перші секунди формування ущільнення досягає максимальної величини, а потім сповільнюється.

Оптимальні значення амплітуди і тривалість під час віброформування зменшуються в міру збільшення частоти коливань.

Порівняно з іншими методами формування вібраційний метод характеризується більшою кількістю регульованих параметрів, причому в більшому діапазоні, що дає змогу оптимально застосовувати умови ущільнення різноманітних сумішей.

Характерними для віброущільнених виробів є їх висока міцність, однорідна структура без повітряної усадки й анізотропії властивостей. Крім того, метод віброформування характеризується невеликими витратами енергії.

За принципом дії і передачі коливань бетонній суміші вібромайданчики поділяють на кілька типів (рис. 7.5).

Одновальні вібромайданчики з коловими коливаннями застосовують для виготовлення виробів завширшки до 1,2 м (рис. 7.5, а). Вібромайданчик являє собою жорстку раму 1, встановлену на пружинах 4. Під рамою розміщений вал з дебалансами, який є віброзбуджувачем 3. На рамі встановлена форма 2.

Вібромайданчики з вертикально направленими коливаннями і маятниковою підвіскою вібратора застосовують для ущільнення малогабаритних виробів і контрольних зразків бетону (рис. 7.5, б). На відміну від раніше розглянутого вібромайданчика вібратор 5 підвішений шарнірно, завдяки чому від вібратора до рами передаються тільки вертикальні коливання.

Двовальний вібромайданчик з вертикально направленими коливаннями застосовують для ущільнення широкої номенклатури

плоских виробів в одиночних і багатомісних формах (рис. 7.5, в). Вертикально направлені коливання утворюються завдяки синхронному обертанню назустріч один одному валу *б* із симетрично розміщеними дебалансами.

Горизонтальні сили, які виникають під час роботи вібраторів, взаємно знищуються, а вертикальні сили додаються і передаються формованому виробу.

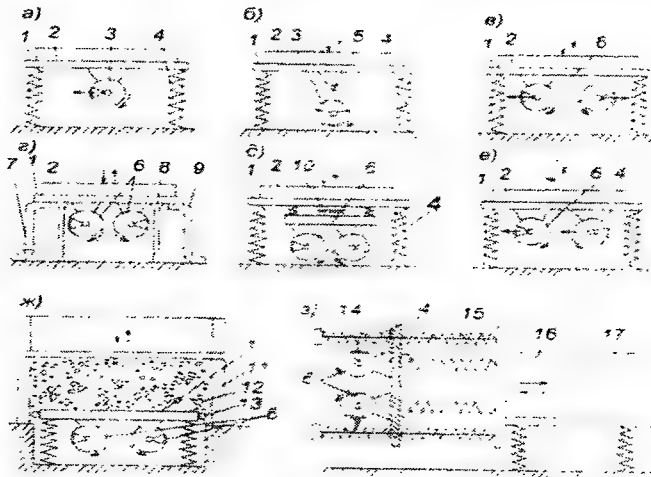


Рис. 7.5. Схема вібромайданчиків

Аналогічний за принципом дії вібромайданчик на повітряній подушці (рис. 7.5, з) має гумовий герметизований контур 8, у який через штуцер 9 нагнітається повітря. При цьому створюється такий тиск в гумовому контурі, щоб рама піднялась над упором 7 на декілька міліметрів і в процесі роботи не торкалась їх. Змінюючи тиск повітря, можна змінювати вантажопідйомність вібромайданчика. Повітряна подушка дає змогу зменшити рівень шуму і вібраційний вплив на працівників.

Вібромайданчики з обмеженим переміщенням віброблока (рис. 7.5, д) використовують для ущільнення сумішей підвищеної жорсткості. Віброблок з вертикально направленними коливаннями *б* підвішений на пружинах 4 до рами 1. Між віброблоками і рамою

встановлюють з невеликим зазором пружні або сталі обмежувачі 10. Завдяки цьому досягають віброударного режиму роботи, збуджуються квазігармонійні коливання, що підвищує ефективність ущільнення бетонної суміші, але зменшує термін роботи вібромайданчика.

Вібромайданчики з двовальним віброблоком крутильних коливань використовують для ущільнення сумішей у виробках великих перерізів (рис. 7.5, е). Крутильні коливання утворюються шляхом встановлення дебалансів на двох валах зі зміщенням на 180°. Вони обертаються синхронно назустріч один одному, що зумовлює обертальний момент із зміною напрямку дії сили.

Вібромайданчик, який працює за принципом вібропоршня, використовують для формування виробів значної висоти (рис. 7.5, ж). Ущільнення суміші відбувається завдяки передачі вертикальних коливань від двовального віброблока *б* через раму 1 бетонній суміші 12. Між рамою і бортами форми 11 встановлено еластичну ущільнювальну прокладку. Завдяки такому методу ущільнення суміші зменшуються витрати енергії внаслідок зменшення коливальної маси (не коливається форма).

Вібромайданчики з горизонтально направленними коливаннями застосовують для ущільнення бетонної суміші у виготовленні довгомірних виробів (колон, балок тощо) (рис. 7.5, з). Віброблок кріпиться до плоскої плити 14, стисненої між пакетами пружин, спеціальним замком з торцювальною стінкою повздовжньої форми 16. Форму встановлюють на гнучких опорах 17. Для створення квазігармонійних коливань і підвищення якості ущільнення в деяких випадках між плитою і рамою установлюють нелінійні обмежувачі коливань.

З метою інтенсифікації ущільнення малорухливих і жорстких сумішей застосовують привантажувачі, які справляють тиск на поверхню бетону $-(3...7) \cdot 10^{-3}$ МПа. Привантажувачі підвищують якість ущільнення і приблизно вдвічі зменшують час віброобробки.

Роликовим пресуванням виготовляють безнапірні і малонапірні залізобетонні труби (рис. 7.6). Форму встановлюють

розтрубом вниз, потім в неї опускають роликову головку і закривають отвір в піддоні (позиція I). Після цього вібромайданчик піднімається до стикування з розтрубом, і через верхній отвір у форму подають жорстку суміш, яка ущільнюється в розтрубній частині за допомогою вібрації і обертальної роликової головки (позиція II). Потім вібромайданчик вимикають, і роликова головка повільно обертається і піднімається вгору, ущільнюючи бетонну суміш (позиція III). Після закінчення формування труби припиняється подача суміші, і головку виймають з форми. Ущільнення суміші відбувається в результаті її набризкування лопатками на стінку форми під дією відцентрових сил під час обертання розподільного диска і роликів. При цьому утворюється слабо ущільнений шар суміші, на 10...15 мм більший за стінку труби.

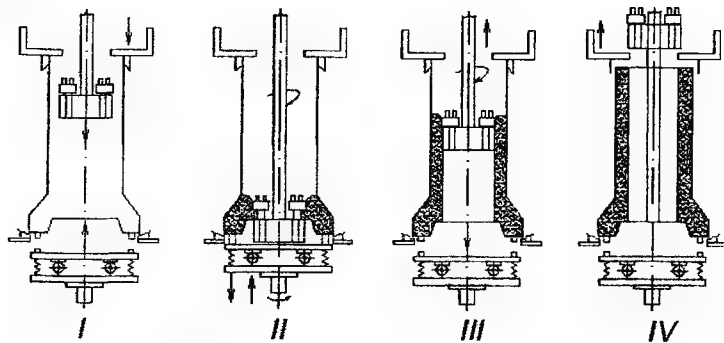


Рис. 7.6. Схеми формування виробів на автоматизованій установці шляхом радіального роликового пресування:

I – завантажена воронка і роликова головка опускається вниз;

II – подача бетонної суміші і формування патрубку;

III – формування циліндричної частини труби;

IV – піднімання завантажувальної воронки і роликової головки

Рамки під час обертання укочують попередньо укладену суміш й остаточно ущільнюють її до досягнення внутрішнього розміру труби.

В аналогічний спосіб формують й інші циліндричні вироби – кільця колодязів, колекторів тощо.

7.5. Центрифугування

Центрифугування є одним з методів безвібраційного ущільнення бетонних сумішей, який застосовують для виготовлення труб, опор ЛЕП, несних колон та інших виробів циліндричної форми завдовжки понад 15 м і діаметром до 2,5 м. Суть цього методу полягає в тому, що завантажена сумішшю форма обертається з великою швидкістю навколо своєї поздовжньої осі. Під час обертання на суміш діють відцентрові сили, в результаті вона рівномірно розподіляється по стінці форми й ущільнюється. Зовнішня конфігурація поперечного перерізу формованого виробу може бути будь-якої форми.

Відцентрові сили, які діють на тверді частинки суміші і води, пропорційні їх масі, квадрату кутової швидкості і відстані від центра маси до осі обертання. Більш важкі компоненти суміші (заповнювачі + цемент) під час обертання з великою швидкістю притискаються до стінки форми, а менш важкий компонент – вода витісняється до внутрішньої поверхні виробу. Кількість води в суміші зменшується, і вона ущільнюється.

Процес формування здійснюють за два етапи: на першому відбувається рівномірне розподілення суміші по зовнішній стінці форми й утворення циліндричної порожнини, на другому – інтенсивне ущільнення суміші під дією відцентрових сил. Слід мати на увазі, що під час обертання форми на суміш, крім відцентрових сил, направлених від осі обертання до стінки форми, діють гравітаційні сили, направлені вниз.

На цьому етапі відцентрові сили повинні бути однаковими або дещо більшими за гравітаційні сили:

$$mw^2r \geq mg, \quad (7.18)$$

де m – маса частинки, кг; w – кутова швидкість, рад/с; r – радіус кола руху частинки, м; g – прискорення вільного падіння, м/с².

Із рівняння (7.18) випливає, що частинки суміші можуть утримуватися у верхньому положенні тільки за певної швидкості обертання форми $w = \sqrt{g/r}$. Виразимо кутову швидкість обертання форми як $w = 2\pi n/60$ і знайдемо мінімальну теоретичну швидкість обертання:

$$n_p = \frac{300}{\sqrt{r}} \cdot \text{хв}^{-1}, \quad (7.19)$$

де r – внутрішній радіус форми, м.

На практиці отриману швидкість потрібно збільшити в 1,5...2 рази, зважаючи на можливий динамічний вплив (удари, поштовхи), які призводять до відриву маси від стінки форми. Для середніх діаметрів труб швидкість обертання становить 60...150 хв⁻¹.

Для ущільнення суміші на другому етапі потрібно, щоби відцентрові сили справляли на бетон тиск 0,07...0,15 МПа. Виходячи з цього, швидкість обертання форми можна визначити за залежністю:

$$n_{ущ} = 100 \sqrt{\frac{26,5 \cdot P}{0,024 F}}, \quad (7.20)$$

де P – відцентровий тиск, МПа; A – коефіцієнт, який дорівнює $\left(R^2 - \frac{r^3}{R}\right)$, де R і r – зовнішній і внутрішній радіуси формованого виробу, м.

Швидкість обертання форми на цьому етапі становить 400...900 хв⁻¹. Чим менший діаметр формованого виробу, тим більшою повинна бути швидкість обертання для створення однакового тиску.

Відцентрове ущільнення здійснюють в апаратах, які називаються центрифугами. Залежно від конструктивних особливостей розрізняють чотири типи центрифуги (рис. 7.7)

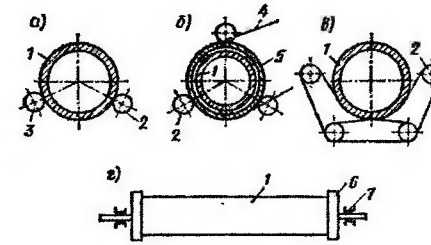


Рис. 7.7. Типи центрифуг:

- a – роликова; b – барабанна; c – гіроскопічна; d – осьова;
 1 – форма; 2 – привідний ролик; 3 – опорний ролик; 4 – привід;
 5 – барабан; 6 – план-шайба; 7 – опорний підшипник

У роликовій центрифугі форму з бандажами встановлюють на ролики. Один ряд роликів, з'єднаних одним валом, є привідним. Форма обертається завдяки фракційним силам зчеплення бандажів з роликами. Форму завантажують сумішшю з відкритих торців за допомогою лоткових або консольних бетонукладачів.

В осьовій центрифугі попередньо завантажена сумішшю форма встановлена на верстат між двома план-шайбами і обертається з ним. Осьові центрифуги розвивають більшу швидкість обертання, ніж роликові, створюють менше шуму, але ускладнюється процес завантаження форми.

Гіроскопічна центрифуга складається з чотирьох валів із шківками, з'єднаних двадцятьма – тридцятьма текстурними пасами, які охоплюють по три шківки. Один вал із шківками – привідний. Форма опускається на текстурні паси. Гіроскопічні центрифуги працюють безшумно і здатні розвивати велику швидкість обертання. Їх недолік – необхідність досить часто міняти спрацьовані паси.

У барабанній центрифугі форму встановлюють і закріплюють усередині стаціонарних барабанів (шківів), які приводяться пасами. Їх використовують для виготовлення довгомірних залізобетонних виробів – циліндричних паль, конічних опор тощо. Завдяки підвищеній жорсткості барабана форми виконують полетшеними.

З метою прискорення ущільнення збільшують швидкість обертання центрифуг, застосовують одночасну дію вібрації і укочування свіжоукладеної бетонної суміші. Установка (рис. 7.8) передбачає ущільнення центрифугування одночасно з вібруванням і подальшим пресуванням внутрішньої поверхні труби. Форму 4 встановлюють на пневматичні опорні ролики 2, до яких вона притискається роликами 5.

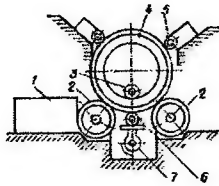


Рис. 7.8. Установка комплексного ущільнення труб:

1 – привід ведучих роликів; 2 – пневматичні опорні ролики; 3 – пресувальний коток; 4 – форма; 5 – притискні ролики; 6 – ролик вібробалки; 7 – вібробалка

Під час обертання форми на опорних рамках відбувається ущільнення суміші важким пресувальним котком 3 всередині форми. Між опорними роликами 2 розміщена вібробалка 7 з роликом 6. Вібробалка створює додаткову вібрацію й ущільнює суміш. За такого методу ущільнення суміші покращується структура бетону і підвищується водонепроникність.

Запитання для самоперевірки

1. У чому різниця між технологічною операцією і технологічним процесом?
2. Назвіть основні технологічні процеси у виробництві будівельних матеріалів.
3. Охарактеризуйте основні закономірності перемішування сипких матеріалів.
4. Назвіть закономірності перемішування рідин. У чому полягає критерій Ейлера?
5. Охарактеризуйте способи формування виробів.

6. Назвіть недоліки методу пластичного формування.
7. Які недоліки методу напівсухого пресування?
8. У чому полягає формування виробів за методом шлікерного лиття?
9. Дайте характеристику методу вібраційного формування виробів.
10. Охарактеризуйте способи формування залізобетонних труб.

Список літератури

1. Дроздов Н.Е. Механическое оборудование керамических предприятий / Н.Е. Дроздов. – М.: Машиностроение, 1975. – 248 с.
2. Гоц В. І. Бетони і будівельні розчини / В.І. Гоц. – К.: УВПК «ЕКСОБ» – К.:КНУБА, 2003. – 446 с.
3. Еремін Н.Ф. Процессы и аппараты в технологии строительных материалов / Н.Ф. Еремін. – М.: Высш. шк., 1986. – 280 с.
4. Плановский А.Н. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии / А.Н. Плановский, П.И. Николаев. – М.: Химия, 1972. – 492 с.
5. Доманский И.В. Машины и аппараты химических производств / И.В. Доманский, В.П. Исаков, Г.М. Островский, В.Н. Соколова. – Л.: Машиностроение, 1982. – 386 с.
6. Дибкова Л.М. Информатика та комп'ютерна техніка. – К.: Академія, 2002. – 318 с.
7. Сивко В.Й. Основы механики вибрируемой бетонной смеси / В.Й. Сивко. – К.: Вища шк., 1987. – 168 с.
8. Технообжиг керамики. – М.: Стройиздат, 1988. – 344 с.
9. Ван Флек Л. Теоретическое и прикладное материаловедение / Л. Ван Флек. – М.: Атомиздат, 1975. – 472 с.
10. Онацкий С.П. Производство керамзита / С.П. Онацкий. – М.: Стройиздат, 1987. – 334 с.
11. Чаус К.В. Технология производства строительных материалов, изделий и конструкций / К.В. Чаус, Ю.Д. Чистов, Ю.В. Лабзина. – М.: Стройиздат, 1988. – 448 с.

12. Овчинников П.Ф. Реология тексотропных систем / П.Ф. Овчинников, Н.Н. Круглицкий, Н.В. Михайлов. – К.: Наукова думка, 1972. – 120 с.
13. Ходаков Г.С. Тонкое измельчение строительных материалов / Г.С. Ходаков. – М.: Стройиздат, 1972. – 238 с.
14. Перегудов В.В. Тепловые процессы и установки технологии полимерных строительных материалов и изделий / В.В. Перегудов. – М.: Высш. шк., 1973. – 294 с.
15. Гусев Б.В. Ударно-вибрационная технология уплотнения бетонных систем / Б.В. Гусев, А.Д. Деминов, Б.И. Крюков. – М.: Стройиздат, 1982. – 150 с.
16. Константинов Ю.М. Гидравлика / Ю.М. Константинов. – К.: Вища шк., 1988. – 398 с.
17. Троицкий В.В. Обогащение нерудных строительных материалов / В.В. Троицкий. – Л.: Стройиздат, 1986. – 192 с.
18. Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию / Н. Кобаяси. – М.: Бином, 2007. – 136 с.
19. Саранча Г.А. Метрологія, стандартизація та управління якістю / Г.А. Саранча, Г.К. Якимчук. – К.: Основа, 2004. – 376 с.
20. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель. – М.: Наука, 1978. – 790 с.
21. Нехорошев А.В. Ресурсосберегающие технологии керамики, силикатов и бетонов / А.В. Нехорошев, Г.И. Цителаури, Е. Хлебионек, Ц. Жадамбаа. – М.: Стройиздат, 1991. – 482 с.
22. Кайнарський І.С. Процессы технологии огнеупоров / І.С. Кайнарський. – М.: Металлургия, 1969. – 352 с.
23. Лищенко В.Г. Справочник по оборудованию предприятий нерудных материалов / В.Г. Лищенко. – К.: Будивэльнык, 1982. – 182 с.
24. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М.: Химия, 1973. – 750 с.
25. Борщ И.И. Процессы и аппараты в технологии строительных материалов / И.И. Борщ, В.А. Вознесенский, В.З. Мухин. – К.: Вища шк., 1981. – 296 с.

Навчальне видання

М.П. Безсмертний

ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ В ТЕХНОЛОГІЇ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Навчальний посібник

Редагування та коректура *Г.В. Кобрині*

Комп'ютерне верстання *І.С. Аришкін*

Підписано до друку 05.12.2014. Формат 60 × 84 1/16

Ум. друк. арк. 11,86. Обл.-вид. арк. 12,75.

Тираж 125 прим. Вид. № 16/І-13. Зам. № 115/І-14

Видавець і виготовлювач

Київський національний університет будівництва і архітектури

Повітрофлотський проспект, 31, Київ, Україна, 03680

E-mail: red-isdat@ukr.net, тел. (044)241-54-22, 241-54-87

Свідцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
Видавничої справи ДК № 808 від 13.02.2002 р.